INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2021 • N.º 543 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

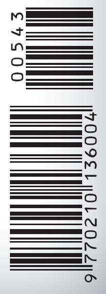
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Yin-yang fractal

La matemática infinita del equilibrio entre opuestos

CATEGORÍAS INFINITAS | YIN-YANG FRACTAL | EL FUTURO DE LA BIODIVERSIDAD

DICIEMBRE 2021 N.º 543





INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Diciembre 2021, Número 543

ARTÍCULOS

GETTY IMAGES/SHULZ/ISTOCK

INFORME ESPECIAL
EL FUTURO DE LA BIODIVERSIDAD







INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

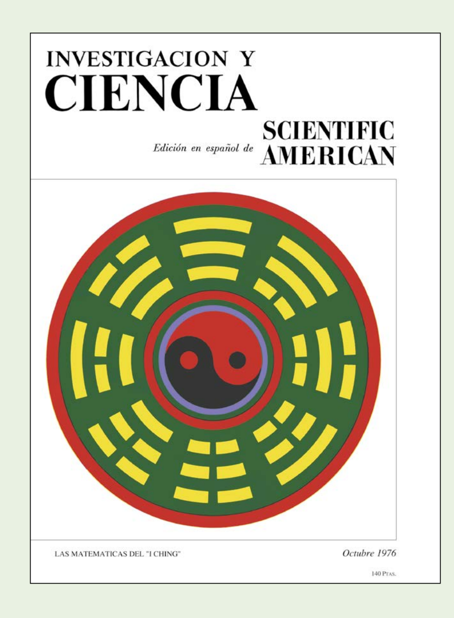
SECCIONES

EN PORTADA

El símbolo del yin y el yang es tan reconocible en Oriente como lo es la cruz cristiana en Occidente. Un examen detallado de su geometría revela que este emblema místico, símbolo de la coexistencia equilibrada de aspectos opuestos, no solo esconde uno de los números más célebres de toda la matemática, sino también una sucesión infinita de números algebraicos que admiten una bella interpretación fractal. Ilustración original de Ilil Arbel/*Investigación y Ciencia*.



Pasado y futuro, papel y digital



Estimados lectores, estimadas lectoras:

Es posible que aquellos de ustedes más veteranos y con mejor memoria hayan sabido reconocer la portada de este número. En efecto, se trata de una versión de la misma portada que, en octubre de 1976, anunciaba el primer ejemplar de *Investigación y Ciencia*. Aquel número inició un camino que acabaría cambiando los estándares de la divulgación científica en el mundo hispanohablante y que, gracias a ustedes, ya dura 45 años.

La razón por la que hoy repetimos portada es que, al igual que aquel número, este ejemplar que sostiene entre las manos o que lee en pantalla anuncia el comienzo de un nuevo camino, uno mejor adaptado a la era digital y a las cambiantes necesidades de los lectores. Tras una etapa de casi dos décadas en que la revista se ha venido ofreciendo en edición tanto impresa como electrónica, a partir de enero de 2022 *Investigación y Ciencia* se publicará exclusivamente como revista digital.

Como no podría ser de otra manera, la revista seguirá manteniendo los mismos estándares de rigor y de conocimiento experto que tan decisivamente contribuyó a asentar en la divulgación científica en castellano. Una prueba de ello la encontrará en este mismo número, cuyos artículos cubren temas tan profundos e inspiradores como los últimos avances en teoría de categorías (una de las ramas más abstractas e importantes de la matemática contemporánea), el concepto de cuasipartícula y el papel esencial que desempeña en la investigación actual en física de materiales, así como varias cuestiones clave de nuestro tiempo, como el desperdicio de alimentos o la protección de la biodiversidad.

Mención aparte merece el artículo que hace honor a la portada, antigua y nueva a la vez, de este último número en papel de *Investigación y Ciencia*. Una emotiva entrega de «Juegos matemáticos» —la única sección de la revista que ha venido publicándose de manera ininterrumpida desde el primer número— donde Bartolo Luque, uno de los mejores divulgadores de nuestro país, nos muestra una vez más que la ciencia no conoce fronteras culturales y donde nos revela la matemática fractal que esconde el símbolo del yin y el yang, o *taijitu*, emblema taoísta de la dualidad y la continua transformación.

Desde el primer número de *Investigación y Ciencia*, han sido multitud de suscriptores y lectores de quiosco y en línea quienes han hecho posible este camino. A partir del próximo año, esa travesía continuará con una *Investigación y Ciencia* digital, caracterizada por el mismo contenido de referencia pero en un formato más moderno, accesible y agradable de leer en pantalla.

Deseamos que siga disfrutando de su lectura. Nos vemos en enero de 2022 en formato digital.

Anna Ferran, *Editora de* Investigación y Ciencia
Ernesto Lozano, *Editor de* Investigación y Ciencia
Laia Torres, *Directora editorial*



Para cuestiones relacionadas con el cambio de modelo (suscripciones, adquisición de números sueltos, etc.): **www.investigacionyciencia.es/faq**



Una nueva serie de técnicas en inteligencia artificial permiten obtener grandes cantidades de información a partir de señales extremadamente débiles.



ALAMY STOCK PHOTO

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Paredes que hablan

Gracias a la IA, una pared desnuda puede revelar cuántas personas hay en una habitación y qué hacen

Si usted se detiene a mirar una pared desnuda en una habitación, lo más probable será que no aprenda de ello nada más que el color de la pintura. Ahora, sin embargo, una nueva técnica puede hacer un barrido de esa misma pared en busca de sombras y reflejos imperceptibles para el ojo humano y analizarlos para determinar todo tipo de detalles, como el número de personas que hay en la habitación o cómo se están moviendo. El nuevo dispositivo permitiría espiar lo que ocurre detrás de las esquinas, extrapolar lo que sucede en la habitación a partir de un vistazo parcial, o controlar los movimientos de alguien que se halla fuera del campo de visión de una cámara.

Cuando una persona se mueve en una habitación, su cuerpo bloquea parcialmente la luz de cualquier tipo, lo que genera sutiles e indefinidas penumbras en las paredes. La ropa de colores vivos puede incluso proyectar sobre la pared un tenue brillo reflejado. Sin embargo, esas débiles señales suelen quedar ahogadas por la luz ambiente. «Si pudiésemos hacer algo parecido a sustraer ese término ambiental de lo que quiera que estemos observando, no quedaría otra cosa que el ruido de la cámara... y una señal», explica Prafull Sharma, estudiante de doctorado del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT).

Sharma y otros investigadores del MIT aislaron ese término ambiental filmando la pared de una habitación mientras sus ocupantes se movían por ella y tomando promedios temporales de los fotogramas. Ello les permitió eliminar las sombras cambiantes arrojadas por las personas y quedarse solo con la luz de la fuente principal y con las sombras de los muebles y de otros objetos inmóviles. Los investigadores retiraron entonces ese término del vídeo en tiempo real, gracias a lo cual pudieron visualizar las sombras en movimiento proyectadas sobre la pared.

Después, los autores filmaron las paredes desnudas de otras habitaciones donde los investigadores representaron diversas escenas y actividades. De una en una o en parejas, algunas personas se movían fuera del campo de visión de la cámara; otras se agachaban, saltaban o movían los brazos. Luego usaron los vídeos para entrenar un algoritmo de aprendizaje automático y que este aprendiera qué penumbras correspondían a qué comportamientos. El sistema resultante pue-

de analizar en tiempo real el vídeo de una pared desnuda de cualquier habitación y determinar el número de personas que se encuentran en ella y cómo se mueven. El trabajo fue aceptado como presentación oral en el reciente Congreso Internacional de Visión Computarizada.

Aunque el nuevo sistema puede funcionar sin calibrado en cualquier habitación, muestra deficiencias cuando el alumbrado es escaso o cuando hay luces que parpadean, como las de un televisor. Además, solo puede inferir el número de miembros de un grupo y aquellas actividades para las que haya sido previamente entrenado. Y necesita una cámara de alta resolución, ya que las cámaras digitales corrientes crean demasiado ruido de fondo.

Pese a sus limitaciones, el método pone de manifiesto la capacidad del aprendizaje automático y del procesamiento de imágenes para transformar indicios imperceptibles en una vigilancia efectiva. «Es un hallazgo científico fantástico comprobar que una señal tan débil pueda usarse para predecir información», valora Sharma. «Por supuesto, el ojo humano no puede hacer nada de eso.»

Las paredes desnudas distan de ser el primer objeto de apariencia inocente capaz de revelar secretos. «[Estos métodos] se conocen como "ataques de canal lateral" o "vigilancia de canal lateral"», explica Bennett Cyphers, tecnólogo de la Fundación Frontera Electrónica, una organización sin ánimo de lucro que promueve los derechos digitales. «Consiste en recurrir a fuentes de información que no se corresponden directamente con lo que estamos buscando —fuentes que no están entre las formas normales de recabar información— para aprender cosas que no parecía posible llegar a saber.»

Los ataques de canal lateral pueden sacar partido de señales extremadamente modestas. El año pasado, un grupo de investigadores se valió de los reflejos de varios objetos brillantes, entre ellos una bolsa de patatas fritas, para reconstruir la imagen de la habitación circundante. Y también los sonidos y otras vibraciones pueden aportar mucha información indirecta. Por ejemplo, el audio de una persona que teclea en un ordenador puede revelar qué palabras está escribiendo. Y hasta un disco duro puede convertirse en un micrófono: en 2019, un equipo desarrolló un programa capaz de analizar la manera en que el sonido ambiental hacía vibrar la cabeza lectora de un disco duro, gracias a lo cual consiguieron grabar las conversaciones que tenían lugar cerca de la máquina.

También se han desarrollado sensores que, colocados en el suelo, detectan las vibraciones de los pasos, son capaces de discernir la identidad de un individuo o incluso de diagnosticar ciertas enfermedades. Muchas de estas técnicas se basan en el aprendizaje automático para detectar patrones que la inteligencia humana no puede percibir. A medida que se generalizan las grabaciones de alta resolución y aumenta la potencia de cómputo, es posible entrenar sistemas con señales muy diversas y extraer de ellas todo tipo de información que normalmente pasamos por alto.

Al menos por ahora, no parece que estos sistemas de vigilancia avanzada quiten el sueño a los defensores de la privacidad. «Este ataque por medio de paredes desnudas y otros ataques de canal lateral muy depurados no deberían preocupar a la gente común», asegura Riana Pfefferforn, investigadora del Observatorio de Internet de Stanford. «Son trucos muy vistosos de investigadores académicos, pero que están muy lejos de ser operativos para las fuerzas policiales.» Su uso generalizado «queda muy lejos en el futuro, si es que llega a darse alguna vez. E incluso si acabara ocurriendo, la policía seguiría sin poder entrar en nuestra casa e instalar cámaras en las ventanas». Cyphers está de acuerdo: «Hoy todo el mundo lleva encima un teléfono inteligente, muchísima gente tiene altavoces inteligentes en casa y sus coches están conectados a Internet», señala. «Las empresas y los Gobiernos no tienen que echar mano de algo como filmar una pared desnuda para conseguir la información que desean».

Aunque por ahora no es probable que los métodos de canal lateral tengan como objetivo a las personas comunes, puede que sí acaben encontrando algunas aplicaciones. «El Ejército y los servicios de inteligencia siempre han sabido encontrar usos concretos para cualquier tipo de método de vigilancia que caiga en sus manos», apunta Cyphers.

Sharma coincide en que tales usos son posibles, pero apunta también que podría haber otros más inocuos. Por ejemplo, los vehículos podrían examinar las paredes desnudas como parte de un sistema autónomo de detección de peatones en zonas con poco ángulo de visión, como los aparcamientos. Y varios investigadores en técnicas de canal lateral han señalado que estas podrían usarse para cuidar a personas ancianas y detectar posibles caídas y otros problemas. Sharma añade que su sistema podría detectar caídas, pero solo si previamente ha sido entrenado con ejemplos. «Me niego a caerme en veinte habitaciones distintas para conseguir esos datos», bromea.

—Sophie Bushwick

CONSERVACIÓN

Patrullar la selva con móvil

La vigilancia comunitaria reduciría la desforestación de la Amazonia

Las iniciativas encaminadas a conservar la selva del Amazonas, hogar de incontables formas de vida y almacén de alrededor de 123.000 millones de toneladas de ese carbono que amenaza con alterar drásticamente el clima, están adquiriendo mayor urgencia si cabe a medida que se acelera la destrucción ambiental. Los pueblos indígenas están intentando proteger la región mediante patrullas que recorren sus límites territoriales para buscar y detener las actividades ilegales, como la construcción de represas, entre otras. Aun así, la desforestación no cesa.

Un nuevo estudio indica que la combinación de la vigilancia sobre el terreno con los datos satelitales y la ayuda de la telefonía móvil podría frenar la desforestación de la cuenca amazónica y posiblemente la de los bosques y selvas en otros lugares. Los resultados se detallan en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

La tala furtiva, la agricultura y el cultivo de la coca suponen una amenaza para la selva amazónica en las comunidades indígenas peruanas que han sido objeto de estudio,

BIOQUÍMICA

Reciclaje radiactivo

Una bacteria común podría ayudar a gestionar los residuos nucleares

Como es bien sabido, los reactores nucleares generan residuos radiactivos que deben almacenarse bajo tierra durante miles de años, lo que supone un coste y esfuerzo considerables. Sin embargo, según un artículo publicado en *Journal of the American Chemical Society*, una proteína sintetizada por un microorganismo común quizá ayude a aliviar esta peligrosa carga.

Dos de los componentes más problemáticos de los residuos nucleares son el americio y el curio: metales con isótopos particularmente longevos que se desintegran mu-

una amenaza de la que suelen ser culpables los forasteros. Los investigadores se preguntaron si sería útil enseñar a los lugareños el uso de las «alertas de desforestación incipiente» enviadas por los satélites.

El equipo científico colaboró con 76 comunidades indígenas, de las que 36 participaron en el uso de esas alertas como medida de vigilancia. A tres personas de cada una de estas últimas comunidades se las instruyó en el uso de un sistema de alerta temprana basado en una aplicación de móvil y a patrullar por los bosques para dejar constancia de los daños.

Durante los dos años siguientes, a los participantes se les retribuyó por su trabajo como supervisores forestales y recibieron alertas mensuales a través de la aplicación cuando los datos satelitales indicaban desmontes en su zona. Investigaron y comunicaron las pérdidas confirmadas a sus comunidades, que decidieron si actuaban ellas mismas para resolver el problema o informaban a las autoridades estatales.

Los investigadores analizaron los mismos datos satelitales de desmonte del período en concreto en las 76 comunidades y hallaron que el programa de alerta reducía la superficie perdida en 8,4 hectáreas durante el primer año, lo que supone una disminución del 52 por ciento con respecto a la pérdida promedio en las comunidades de referencia en que no se aplicó el programa, afirma la coautora del estudio Tara Slough, economista política de la Universidad de Nueva York. «Esa reducción de la desforestación se concentró en las


Selva tropical amazónica en Brasil.

comunidades que sufrían la mayor amenaza» de destrucción de la selva, añade. «De continuar el programa, debería ir dirigido este tipo de comunidades; se evitarán así grandes pérdidas de la cobertura arbórea.»

Los resultados del programa de vigilancia no fueron tan sobresalientes durante el segundo año, cuando la superficie perdida solo se redujo en 3,3 hectáreas con respecto a las comunidades de referencia. Se ha argumentado que una campaña contra el cultivo de la coca impulsada por el Gobierno peruano ese año pudo tener efectos disuasorios tanto en los territorios de las comunidades donde se desarrolla la prueba como en las de referencia, lo que habría acortado las diferencias entre los dos grupos comparados en el programa piloto.

Los expertos opinan que esa estrategia para atajar la desforestación de la Amazonia basada en la supervisión comunitaria combinada con las alertas a través del teléfono móvil parece alentadora. «¿Funcionará en todas las comunidades con alto riesgo de desforestación? A la vista de los resultados, vale la pena probarlo», asegura Catherine Tucker, investigadora de la gestión forestal en la Universidad de Florida, que no ha intervenido en el estudio. Con todo, algunas comunidades tal vez no dispongan de los recursos necesarios para un programa de ese tipo, o sus territorios pueden albergar codiciados yacimientos minerales o petrolíferos que agravarían el riesgo de desforestación por personas venidas de fuera, pese a las campañas de vigilancia, subraya Tucker.

Los grupos indígenas podrían seguir con la labor que han emprendido en el programa piloto. «Queremos repetir la experiencia en otras comunidades. Esa será nuestra contribución al planeta», escribe Francisco Hernández Cayetano, miembro de una comunidad participante en la investigación y presidente de la Federación de las comunidades ticuna y yaguas del Bajo Amazonas (Fecotyba). «Como pueblos indígenas, pedimos ayuda al mundo.»

—Annie Sneed

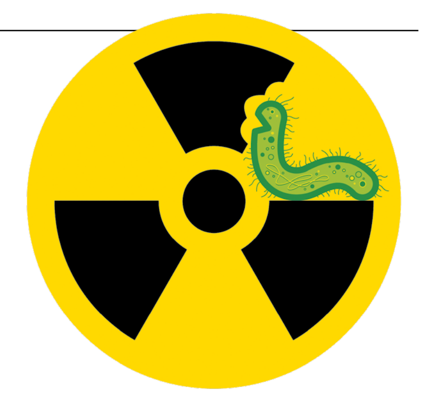
---

cho más despacio que el uranio, por lo que su control ha de prolongarse durante miles de años. Además, debido a la cantidad de calor que irradian, los contenedores que albergan estos residuos deben enterrarse con cierto distanciamiento. Según Joseph Cotruvo, bioquímico de la Universidad Estatal de Pensilvania, es fundamental que se aíslen de la forma correcta para proteger a las personas y al entorno. «Es un problema enorme que estos elementos acaben circulando libremente, aunque sea en cantidades ínfimas», señala el experto.

En 2018, Cotruvo y sus colaboradores hallaron que *Methylorubrum extorquens*, una bacteria inocua que suele crecer en el suelo y en las plantas, sintetiza una proteína denominada lanmodulina. Su función consiste en absorber metales presentes en la naturaleza, normalmente del grupo de los lantánidos, a fin de impulsar el metabolismo del microorganismo.

Más tarde descubrieron que la lanmodulina se unía fuertemente al americio y al curio. No solo eso, sino que los prefería a muchas de las sustancias habituales. Además, el enlace era miles de veces más estable que el que suele establecer con el siguiente pretendiente molecular más fuerte. Por ahora los autores no están seguros de si la lanmodulina producida por la ubicua *M. extorquens* atrae o dispersa de forma natural los iones de americio y curio que ya existen en el ambiente, como los liberados por las pruebas atómicas y las fugas de residuos.

Los investigadores proponen integrar la proteína en filtros de radiación a fin de extraer estos metales radiactivos de larga duración. A continuación podrían aislarse por separado, lo cual reduciría el volumen del material para el que se requiere una vigilancia y un distanciamiento prolongados. Como alternativa, Cotruvo sugiere que el americio y el curio así capturados se reciclen y vuelvan a incorporarse al combustible nuclear. Según Gemma Reguera, microbióloga de la Universidad Estatal de Michigan que no participó en el estudio, se da la feliz coincidencia de que una molécula creada por una bacteria puede ayudar a desarrollar instrumentos para rastrear y recuperar contaminantes peligrosos: «Es como un juguete», comenta. «Las posibilidades son innumerables.»



—Nikk Ogasa

GETTY IMAGES/DDURRICH/ISTOCK (*selva*); THOMAS FUCHS (*símbolo de radiactividad*)

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Trompa prestidigitadora

La capacidad del elefante para convertir acciones sencillas en movimientos complejos intriga a los expertos en robótica

Los elefantes manejan su gruesa trompa con primor y fuerza, pues tan pronto cogen con delicadeza una hoja como alzan un pesado tronco con ella. Los estudiosos se han estrujado los sesos por averiguar cómo lo consiguen, pero ahora, gracias a las técnicas de captación de movimientos tomadas de la industria cinematográfica, una nueva investigación publicada en *Current Biology* desvela parte de la respuesta.

«Los elefantes han desarrollado un órgano sorprendente, dotado de una cantidad infinita de grados de libertad», asegura Michel Milinkovitch, autor principal y biólogo de la Universidad de Ginebra. Su equipo viajó a una reserva sudafricana para estudiar cómo explotan estos colosos esa libertad. Los investigadores adhirieron marcadores reflectantes a las trompas de dos machos y depositaron varios objetos ante ellos. Por medio de una batería de cámaras infrarrojas dispuestas en semicírculo captaron el desplazamiento de los marcadores en las tres dimensiones del espacio mientras los paquidermos manipulaban y movían los objetos. El proceso se asemeja al usado para cartografiar los movimientos de los actores en las películas en que se infunde vida a personajes generados por ordenador.

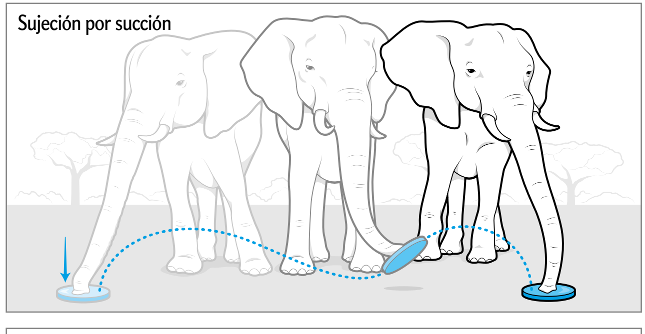
Igual que la lengua humana, la probóscide es un tipo de hidrostato muscular: un órgano carente de huesos que puede moverse de infinidad de formas. El estudio revela que los machos combinan las acciones sencillas como enroscar, retorcer o alargar partes de la trompa para lograr movimientos complejos. Los animales también forman seudoarticulaciones, secciones rígidas de la trompa cuya longitud y número varían a voluntad. «Es la primera vez que obtenemos pistas de cuáles pueden ser esas órdenes simplificadas en los elefantes. Creo que es un avance bastante importante», opina William Kier, biólogo de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill que estudia el movimiento de la trompa, la lengua y los tentáculos, por lo demás ajeno al estudio.

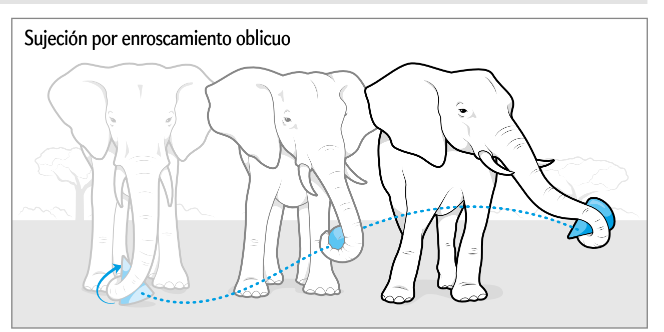
Esta investigación de cómo se coordinan los 40.000 músculos de la probóscide del elefante será inestimable para diseñar nuevos robots versátiles, afirma Cecilia Laschi, especialista en robótica de la Universidad Nacional de Singapur, que tampoco ha participado en el trabajo: «Es el sueño de cualquier diseñador de robots».

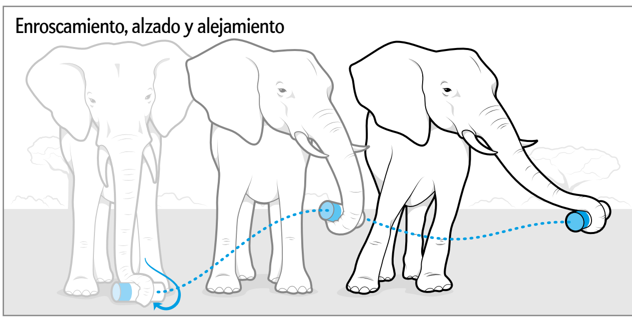
Un equipo de ingenieros de Pisa está usando los datos del estudio y espera tener listo un prototipo de robot trompiforme en 18 meses.

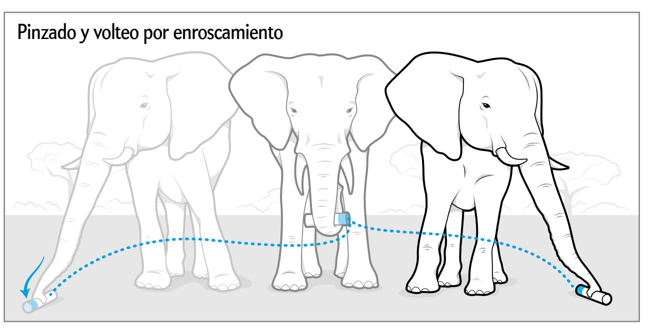
—*Susan Cosier*

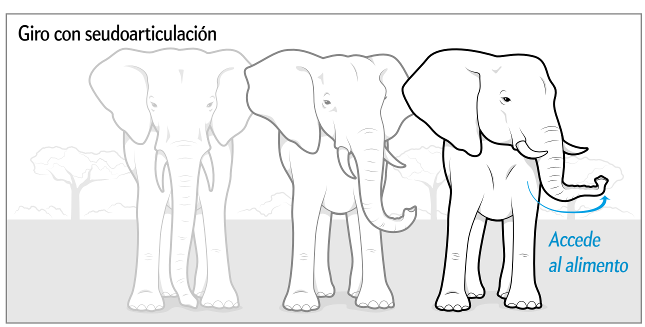
Seis secuencias motrices del elefante

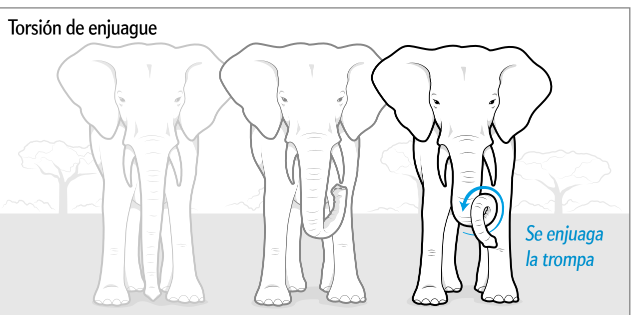












FUENTE: «ELEPHANTS EVOLVED STRATEGIES REDUCING THE BIOMECHANICAL COMPLEXITY OF THEIR TRUNK», PAULE DAGENAIS ET AL. EN *CURRENT BIOLOGY*, VOL. 31, 8 DE NOVIEMBRE DE 2021. ILUSTRACIONES DE BROWN BIRD DESIGN

PALEONTOLOGÍA

El viaje de un mamut

Las capas de crecimiento de un colmillo revelan un periplo épico a través de Alaska

El mamut es una de las especies más emblemáticas de la fauna de la última glaciación. Los fósiles suelen ofrecer una instantánea congelada en el tiempo de la vida de un individuo, pero, hace poco, un equipo empleó uno para averiguar los lugares recorridos por un macho desde el nacimiento hasta la muerte. Por medio del análisis de sustancias contenidas en un colmillo de 17.100 años de antigüedad, descubrieron que anduvo en busca de alimento y de pareja lo suficiente como para dar la vuelta al mundo dos veces.

«Los colmillos son como cápsulas del tiempo» que cada año engrosan con una capa a la que se incorporan sustancias del entorno, explica Matthew Wooller, paleoecólogo en la Universidad de Alaska en Fairbanks. Con ayuda de sus colaboradores, abrió por la mitad un colmillo de 170 centímetros de largo con el fin de medir las proporciones de ciertas sustancias en cada capa y reconstruir los itinerarios de este proboscídeo prehistórico. A lo largo de 28 años, el animal recorrió 80.000 kilómetros por lo que hoy es Alaska. El equipo planea aplicar la misma técnica a otros colmillos fosilizados. «Tenemos cientos», confiesa Wooller.

—*Tess Joosse*

El crecimiento de los colmillos

Tras la caída del primer juego de «colmillos de leche», entre los seis meses y el primer año de vida, nacía el par de piezas permanente. Los colmillos adultos crecían de dentro hacia afuera sin cesar durante toda la vida mediante la acumulación de capas sucesivas de dentina sobre el centro hueco, segregadas por las encías. Así pues, la punta del colmillo corresponde a los años de juventud, y las capas más internas, a sus años postreros.

Cavidad pulpar

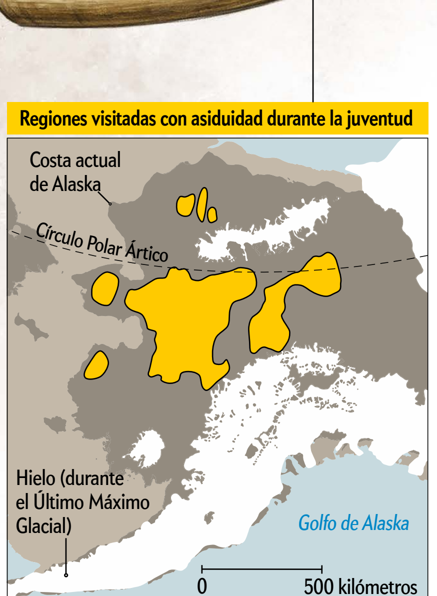
Tiempo

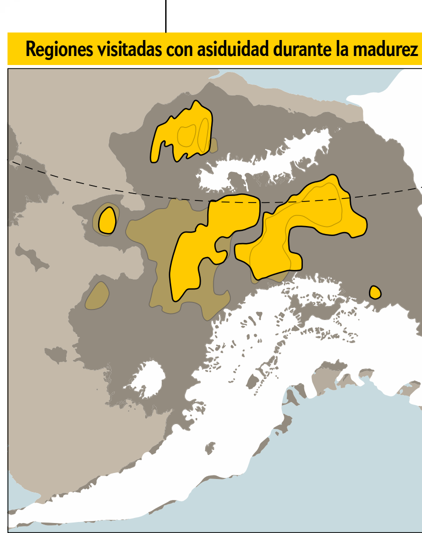
Marfil nuevo

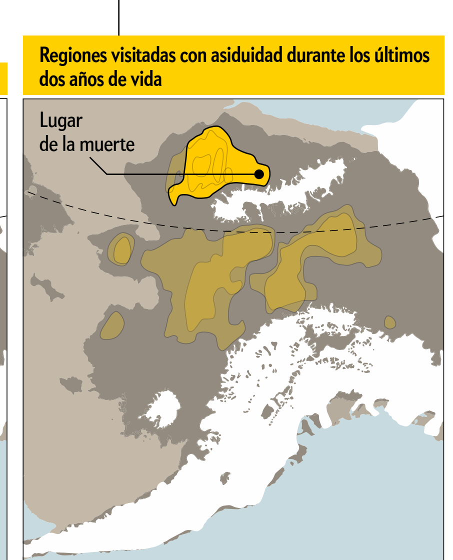
Marfil viejo

El viaje de un mamut

El estroncio es un metal alcalinotérreo que se halla en la naturaleza en distintas formas o isótopos, cada una dotada de una masa atómica singular. Las proporciones de estos isótopos son variables en los suelos del planeta y, cuando el mamut se alimentaba de vegetación, una pequeña cantidad de ese estroncio quedaba retenida en el esqueleto, la dentición y los colmillos. El análisis de los isótopos en cada una de las capas de crecimiento del colmillo permite averiguar por donde vagó en cada etapa vital.







FUENTE: «LIFETIME MOBILITY OF AN ARCTIC WOOLLY MAMMOTH», MATTHEW J. WOOLLER ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 373, AGOSTO DE 2021 (*referencia del mapa*); ILUSTRACIÓN DE BETH ZAIKEN, MAPAS DE JEN CHRISTIANSEN

ECOLOGÍA

Un oasis en la roca madre

Las raíces de los árboles horadan el lecho rocoso para acceder a la preciada agua embebida

Los naturalistas hace tiempo que conocen ejemplos de árboles que, no satisfechos con atravesar el suelo con sus raíces, han horadado la roca madre subyacente en incursiones extraordinarias que se consideraban meras curiosidades. Pero, en 2013, la hidróloga Daniella Rempe llevó a cabo sondeos profundos en las colinas del norte de California y descubrió que las raíces extraen importantes volúmenes del líquido elemento de los poros y las grietas del lecho rocoso, donde el agua subterránea se infiltra y queda retenida. «Queríamos hacernos una idea del alcance del fenómeno», explica Erica McCormick, ecohidróloga en el laboratorio de Rempe, sito en la Universidad de Texas en Austin. Con ese fin, el equipo decidió cartografiar el consumo vegetal del agua embebida en la roca madre en todos los Estados Unidos.



Las raíces atraviesan el suelo en busca de agua.

El equipo de investigación combinó montones de datos geológicos, obtenidos desde 2003 hasta 2017, para averiguar en qué lugares los bosques y los matorrales del país crecen sobre lechos de roca que pueden ser accesibles para las raíces. Después aplicaron los índices medidos de precipitación, evaporación y contenido de agua en el suelo para calcular el volumen de agua en circulación de origen desconocido, presumiblemente procedente de reservas acumuladas en los estratos rocosos profundos. Este análisis, publicado en *Nature*, reveló que el agua embebida en la roca madre dista de ser el último recurso para numerosas plantas. Al menos el 24 por ciento de los árboles y los arbustos del país aprovechan habitualmente esa fuente para saciar la sed, incluso en los años de lluvias normales. Y en los cálidos y áridos estados de California y Texas, más del 50 por ciento del agua absorbida por los árboles procede de ella.

TELECOMUNICACIONES

Satélites a la carta

Un nuevo proyecto permite reprogramar satélites en pleno vuelo

Dentro de poco, empresas, Gobiernos y clientes tendrán la oportunidad de acceder a los instrumentos de un satélite y asignarles nuevas misiones sobre la marcha. Según Frédéric Piro, director del programa Eutelsat Quantum, este será el primer satélite comercial del mundo que pueda reprogramarse enteramente en órbita. Lanzado el verano pasado desde la Guayana Francesa y equipado con antenas ajustables y haces de transmisión reconfigurables, el aparato puede ejecutar un amplio abanico de acciones y cambiar en cuestión de minutos de una a otra a más de 10.000 metros sobre la superficie terrestre.

La compañía asegura que los Gobiernos podrían usarlo para tareas como la prevención de catástrofes o el control de fronteras, al tiempo que los operadores privados podrían emplearlo para organizar las telecomunicaciones por aire y por mar. Según Therese Jones, directiva de la Asociación de la Industria de Satélites de EE.UU., Eutelsat Quantum «destaca en aplicaciones de movilidad, pues puede reasignar canales de comunicación a aviones, barcos o vehículos en tierra en función de su demanda en tiempo real». Sus ocho haces de radiofrecuencia ayudan a mantener las comunicaciones con fuentes en movimiento, «algo que a los satélites tradicionales que solo cuentan con un haz ancho les resulta mucho más difícil», continúa Jones, que es ajena al proyecto.

Asimismo, el satélite detecta transmisiones no autorizadas que pudieran afectar a las señales y lidia con ellas variando de modo automático la frecuencia o la potencia de los haces para evitar perturbaciones. Se trata de una característica importante, pues cada vez resulta más sencillo perturbar señales emitiendo «ruido» en la misma frecuencia que utiliza un satélite, afirma Jones. «Lo único que se necesita es un inhibidor o bloqueador, algunos de cuyos modelos pueden adquirirse por menos de cien dólares. Mientras que antes solo algunos agentes estatales podían permitirse interferir señales de satélites, ahora lo hacen incluso organizaciones pequeñas», añade. «A veces se trata de algo intencionado, aunque en otros casos no son más que interferencias involuntarias causadas por dispositivos de radio de cualquier otro tipo.»



OLIVER STREW/GETTY IMAGES (*raíces*); © ESA, S. CORVAJA (*satélite*)

El agua acumulada en la roca madre ayudaría a algunos árboles a resistir las condiciones secas que acarreará el cambio climático, pero las iniciativas actuales para predecir cómo soportarán los bosques el futuro calentamiento no suelen tenerla en cuenta en sus previsiones, asegura Susan Schwinning, ecóloga de la Universidad Estatal de Texas que no ha participado en el estudio. «La investigación demuestra que no es solo un fenómeno localizado, sino que debe buscarse por doquier», añade. Los autores centran ahora su atención en el modo en que las plantas aprovechan el agua acumulada en la roca madre en los lugares de estudio, ya que California soportará sequías cada vez más severas, advierte Rempe.

¿Pero cómo se abren paso las raíces relativamente endebles a través de la roca? Las capas de suelo y de roca subyacente son más o menos discontinuas, explica. El agua de la lluvia se infiltra y con el tiempo degrada el estrato rocoso profundo, creando delgadas fracturas en las que penetran y crecen los brotes radiculares que absorben el agua acumulada cuando la necesitan. Los microbios y los hongos que se aferran a las raíces contribuyen a extender la superficie de contacto y ayudan a bombear el líquido desde las fisuras más diminutas. «Encuentran un lugar acogedor en los poros. Allí abajo hay todo un mundo», concluye Rempe.

—*Tess Joosse*

Piro afirma que el *software* cuenta con un cifrado robusto que lo protege contra el pirateo. Por su parte, Jones señala que en general los satélites suelen tener fuertes sistemas de seguridad, ya que también se dedican a servicios militares. La mayoría de los problemas surgen de errores cometidos por los usuarios, como una mala elección de contraseñas.

Para diseñar una misión, los clientes pueden utilizar una aplicación informática para seleccionar la capacidad y el área de cobertura de la tarea. «El programa calculará estos parámetros y los dirigirá a la nave», explica Piro. «Todo ello se hará de manera autónoma, sin la participación del operador. Además, los clientes pueden diseñar previamente más de una aplicación y alternar entre ellas con solo pulsar un botón.»

El satélite se desarrolló gracias a una colaboración público-privada entre la Agencia Espacial Europea y otras entidades. «Con Eutelsat Quantum», concluye Piro, «hemos conseguido una tecnología asequible, accesible y con salida comercial».

—*Dhananjay Khadilkar*

GENÉTICA

Tigres negros endogámicos

Una pequeña población de los felinos dotada de una coloración peculiar muestra la evolución en acción

Las franjas del tigre no son inmutables, y en la reserva india de Similipal no escasean los ejemplos. El tigre negro, como se lo denomina, una variante mutante que luce franjas más anchas y superpuestas, era una rareza incluso hace siglos, cuando este felino era mucho más abundante; hoy uno de cada tres ejemplares de Similipal lo son. Un estudio publicado recientemente en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* acota con precisión el origen genético de ese rasgo peculiar y enseña que estos felinos amenazados están inmersos de lleno en un proceso evolutivo.

Después de secuenciar el genoma de tres tigres negros nacidos en zoológicos y de sus progenitores de rayas normales, investigadores del Centro Nacional de Ciencias Biológicas de India y sus colaboradores han seguido el rastro hasta dar con un minúsculo cambio en el gen *taqpep*. Durante dos años han recorrido mil kilómetros por las junglas de todo el país recogiendo heces, pelo, sangre y saliva de tigre. Con el análisis de esas muestras han determinado la prevalencia del gen alterado y han confirmado su práctica ausencia en los tigres de fuera de Similipal.

Ya se sabía que los genes *taqpep* alterados son responsables del pelaje atigrado en los gatos, así como de las atípicas manchas y franjas del guepardo real. Pero esas tipologías son infrecuentes porque solo aparecen cuando ambos progenitores poseen el gen mutante. En la nueva investigación se ha comprobado que 10 de los 12 tigres analizados en Similipal son portadores de al menos una copia de esa mutación de *taqpep*, y cuatro son negros, portadores de dos copias. Curiosamente, ninguno de los 395 ejemplares analizados fuera de la reserva poseía ni siquiera una copia de la mutación. De este hecho se colige que la población de la reserva permanece tan aislada que nunca se ha cruzado con tigres de otros lugares, y que ha comenzado a conservar los cambios genéticos durante generaciones. «Es algo insólito», destaca el ecólogo molecular y autor principal del estudio Vinay Sagar.

Para otro de los autores, Uma Ramakrishnan, ecólogo molecular que estudia la menguante diversidad genética del tigre indio desde hace más de una década, el hallazgo es «el descubrimiento más interesante» de su carrera, una prueba contundente de la fragmentación del hábitat que sufren los tigres en la región.

Los extensos datos recogidos «ofrecen una muy necesaria base de partida para nuevos estudios sobre la genética del amenazado tigre», asegura Nancy Chen, bióloga evolutiva de la Universidad de Rochester, que no ha participado en el estudio. Hoy por hoy se ignora si esas insólitas franjas suponen una ventaja o un inconveniente para los tigres de Similipal, pero evidencian que estos grandes felinos se están reproduciendo exclusivamente entre ellos, quizá no para bien.

—*Spoorthy Raman*



RAJESH KUMAR, PARQUE BIOLÓGICO MOHAPATRA NANDANKANAN

GEOLOGÍA

Los terremotos, fuente de minerales en el noroeste ibérico

Un nuevo modelo permite explicar los cambios en la profundidad a la que se producen los terremotos. Los resultados podrían ayudar a entender el origen de algunos yacimientos minerales del noroeste peninsular

JAVIER FERNÁNDEZ-LOZANO



ORO NATIVO en un filón de cuarzo localizado en la antigua mina romana de la cueva del Mouro (Tabuyo del Monte, León).

JAVIER FERNÁNDEZ-LOZANO

Una madrugada de octubre de 1899, una brusca sacudida despertó a los habitantes de la localidad zamorana de Puebla de Sanabria. Los edificios temblaban, los tabiques se agrietaban, y en el interior de las casas las vajillas y otros objetos caían al suelo. Eran los efectos de un sismo del que solo se pudo registrar los daños causados. Con una intensidad V en la escala de Mercalli, aquel terremoto fue uno de los más fuertes sentidos en todo el noroeste peninsular. Pero ¿cómo se explica un terremoto ocurrido a cientos de kilómetros del borde activo de las placas tectónicas?

Como si se tratase de una alfombra a la que golpeamos desde un lateral, las fuerzas que se producen en los bordes de placas tectónicas se transmiten hacia el interior. Ello genera una acumulación de tensiones en la corteza terrestre, las cuales pueden liberarse bruscamente cuando se supera la resistencia de la roca. Ese proceso inicia pequeñas grietas que, tras ampliarse lo suficiente, romperán formando una fractura y, finalmente, desencadenarán un terremoto.

Sin embargo, no está del todo claro por qué varía la profundidad de estos fenómenos; es decir, lo que los geólogos denominamos el hipocentro de un terremoto. En un trabajo reciente, un equipo de investigadores de las universidades de León, Complutense y Rey Juan Carlos de Madrid hemos analizado, por medio de un modelo analógico, las causas de estos cambios en el noroeste peninsular. Nuestros resultados, publicados en la revista *Tectonics*, apuntan a que esas variaciones en profundidad tendrían su origen en la circulación de fluidos hidrotermales. Un hallazgo que, además de su importancia en términos estrictamente geológicos, reviste importantes implicaciones para entender la génesis y la

distribución de los yacimientos mineros de la región.

Modelizar el interior terrestre

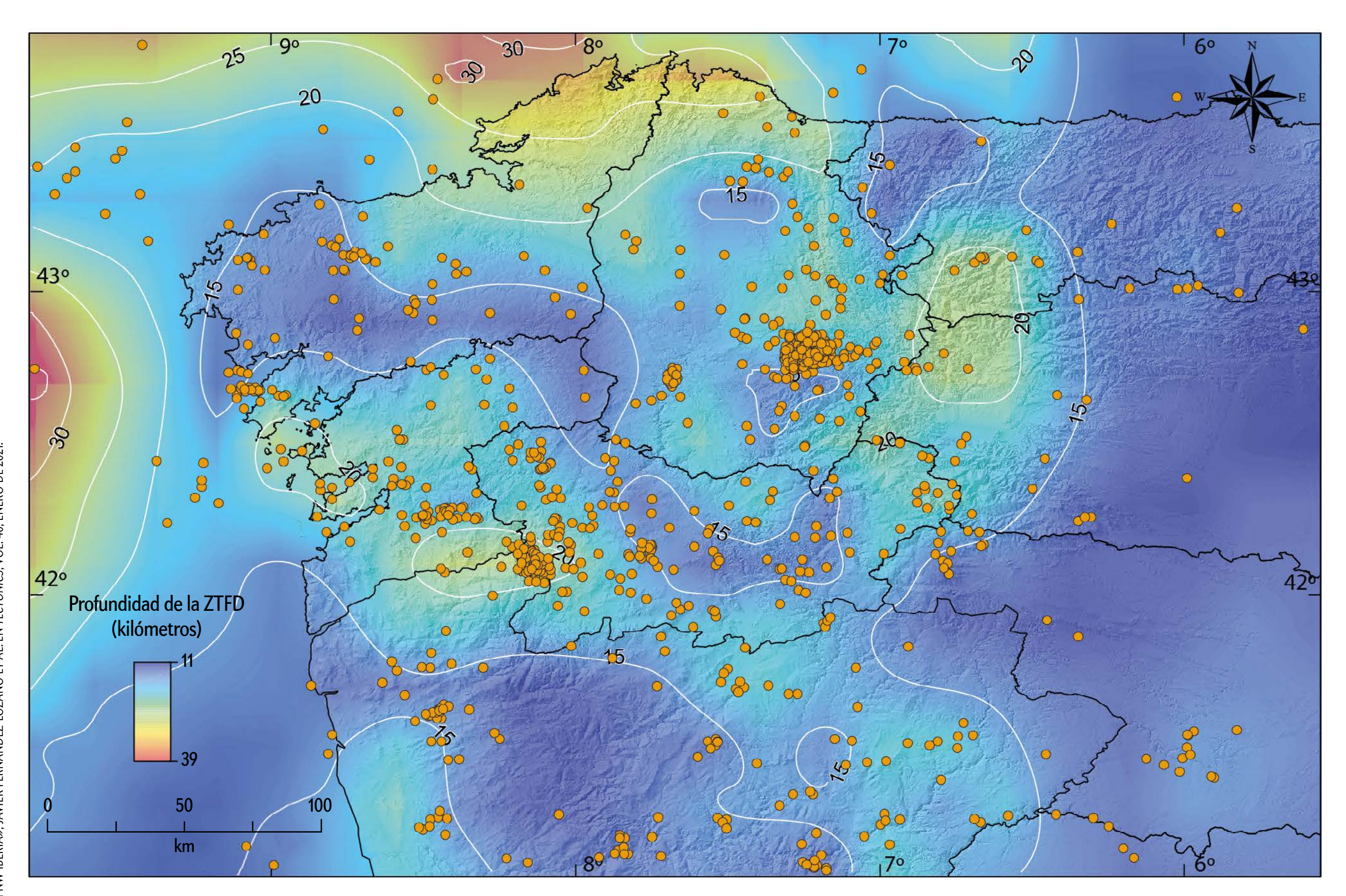
Para estudiar estos terremotos, nuestro equipo elaboró una réplica a escala del noroeste peninsular. Como si se tratara de una tarta de San Marcos, este tipo de modelos constan de capas superpuestas formadas por arena coloreada y silicona. Por su tendencia dúctil y más viscosa, la silicona presenta unas características semejantes a las de la corteza inferior terrestre, la cual se deforma lentamente cuando se aplica una fuerza, tal y como lo haría un chicle que se estira entre las manos. Por su parte, la arena de cuarzo y feldespato, procedente de las costas del mar del Norte, se comporta de forma parecida a la corteza superior: frágil, absorbiendo las deformaciones y liberando rápidamente las tensiones a través de las rupturas. Al ajustar adecuadamente determinadas variables (como la compensación de fuerzas que actúan sobre el modelo, la magnitud de las deformaciones que experimenta y las propiedades físicas de los materiales que se someten a deformación), es posible asegurar su semejanza con el análogo natural.

Para entender el funcionamiento de las fracturas, el modelo fue deformado desde lados opuestos. Con ello simulamos las dos fases tectónicas que han contribuido a la formación del relieve actual de la península ibérica durante el llamado ciclo orogénico alpino, responsable de la formación de las altas cumbres de los Pirineos, la cordillera Cantábrica y las cordilleras Bético-Rifeñas, entre otras. Además, empleamos una técnica conocida como velocimetría de imagen de partículas, que, gracias a unos algoritmos matemáticos aplicados al comportamiento de posos de café depositados sobre el modelo, permite medir las deformaciones que se producen antes de que las fracturas sean observables en la superficie.

Variaciones en profundidad

Una falla es una fractura que rompe la roca cuando, como consecuencia de los esfuerzos tectónicos, la tensión acumulada se libera bruscamente en forma de ondas sísmicas que recorren el interior terrestre. La energía liberada en cada evento vuelve a acumularse en otras zonas cercanas, lo que inicia de nuevo el proceso de carga y descarga de tensiones a través de la ruptura de nuevas fracturas y de la reactivación de las preexistentes. Este fenómeno da lugar a «enjambres sísmicos» que pueden mantener temblando una región durante días, como ocurrió en La Palma en septiembre de este año antes del inicio de la erupción volcánica de Cumbre Vieja.

En el noroeste peninsular, este proceso parece ser el responsable de importantes crisis sísmicas, como las registradas en las localidades gallegas de Sarria, Triacastela y Becerreá a finales de los años noventa del siglo pasado, así como la ocurrida en Laza en mayo de este mismo año. A pesar de que este comportamiento explica razonablemente bien la sismicidad en determinadas zonas del noroeste, como Galicia, aún no se conocen con exactitud



LA ZONA DE TRANSICIÓN FRÁGIL-DÚCTIL (ZTFD) es una región del interior terrestre que condiciona la profundidad a la que se producen los terremotos. Este mapa muestra la profundidad de la ZTFD en las inmediaciones de Galicia (*colores*) y las localizaciones del registro histórico de sismos (*puntos naranjas*). Un nuevo modelo ha permitido explicar las diferencias de profundidad en los hipocentros a partir de la circulación de fluidos hidrotermales.

ADAPTADO DE: «NEW INSIGHTS INTO THE LATERAL-STRENGTH VARIATIONS AND DEPTH TO THE BRITTLE-DUCTILE TRANSITION ZONE IN NW IBERIA»; JAVIER FERNÁNDEZ-LOZANO ET AL. EN *TECTONICS*, VOL. 40, ENERO DE 2021.

las causas que controlan la profundidad a la que esta se produce.

En el interior terrestre existe una región denominada zona de transición frágil-dúctil, la cual está caracterizada por un rápido descenso de la sismicidad hasta su desaparición. En el noroeste peninsular, la profundidad de esta zona es variable, desde los 10 kilómetros hasta un máximo de 25. Al estudiar el comportamiento de nuestro modelo, conseguimos establecer qué mecanismo podría contribuir a tales cambios en la profundidad de los terremotos.

Según nuestro análisis, esa variación estaría controlada por la circulación profunda de fluidos calientes de origen hidrotermal. Dichos fluidos contribuyen aumentando la presión y facilitando la ruptura de la roca a distintas profundidades, lo que explica los cambios en la profundidad de los sismos. Este resultado reviste además una gran relevancia desde el punto de vista económico e industrial, ya que esos mismos fluidos guardan una estrecha relación con la formación de numerosos yacimientos minerales.

Fluidos y minerales

Hace dos mil años se inició una de las mayores campañas de explotación minera de la historia. En época del Imperio romano, el noroeste de la península ibérica se convirtió en uno de los mayores complejos mineros para la extracción de oro. Su mejor exponente son las minas de Las Médulas, en El Bierzo, declaradas por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad en 1997.

El origen de este oro, junto con otros elementos de interés económico en la actualidad como el cobre, la plata, el estaño y el wolframio, se localiza en depósitos hidrotermales, donde los fluidos acuosos calientes han desempeñado un papel clave. Sin embargo, no todos los procesos de este tipo forman yacimientos minerales importantes. En ocasiones, como en muchas regiones de Galicia, Zamora y Salamanca, estas aguas calientes dan lugar a termas naturales y balnearios. Por tanto, para que se desarrollen yacimientos metálicos, debe existir una fuente generadora de fluidos capaz de mantener disueltos los metales y los minerales, además de un mecanismo que facilite su circulación y que permita la precipitación de los elementos de interés.

Los fluidos hidrotermales que producen depósitos minerales son salmueras que contienen concentraciones elevadas de dióxido de carbono y otras sustancias que, como el cloro y el azufre, aumentan la solubilidad de los metales y contribuyen a su movilización. Además, algunos estudios recientes han puesto de manifiesto que la formación del oro hidrotermal podría estar favorecida por el transporte de nanopartículas de oro que, debido a su baja solubilidad, forman agregados floculados durante el enfriamiento de los fluidos en su camino hacia la superficie.

Aunque el origen de las aguas es diverso (desde fluidos magmáticos, metamórficos o sedimentarios profundos, pasando por las frías aguas marinas), es habitual que las aguas de lluvia o meteóricas se infiltren a través de fracturas en la corteza terrestre y alcancen grandes profundidades. Una vez que se calientan y adquieren temperaturas comprendidas entre los 50 y los 600 grados Celsius, vuelven a la superficie por convección. Este proceso constituye la principal causa de circulación de agua en profundidad.

Nuevos yacimientos

Nuestro estudio tiene por tanto una doble implicación, ya que los fluidos calientes responsables de los cambios de profundidad en los terremotos podrían serlo también de la génesis de importantes yacimientos minerales. La presencia de grandes fallas que atraviesan la corteza terrestre desempeña un papel fundamental en los procesos de formación de depósitos minerales. Estas estructuras funcionan como válvulas que bombean los fluidos desde las zonas profundas, sometidas a grandes presiones, hasta la superficie.

En ocasiones, la rápida variación en las condiciones físico-químicas del interior terrestre da lugar a la formación de venas y filones de cuarzo que cementan las paredes de estas fracturas, sellándolas y rellenando el núcleo de estructuras plegadas que, por su forma característica, reciben el nombre de «depósitos en silla de montar». La entrada de nuevos fluidos puede aumentar la presión hasta iniciar la dilatación necesaria para reabrir estas fracturas, rompiendo el sello de cuarzo y favoreciendo el escape de fluidos mineralizantes hacia zonas superficiales. Estos filones constituyen muchos de los principales yacimientos primarios de estaño, wolframio y oro existentes en todo el noroeste.

La meteorización de estos yacimientos y los procesos de transporte y sedimentación a partir de ríos y torrentes en zonas montañosas constituye el principal mecanismo de formación de los yacimientos secundarios, o «placeres». Estos se forman en terrazas de antiguos cauces fluviales abandonados y abanicos aluviales, algunos de gran interés histórico, como el que da origen al conjunto aurífero de Las Médulas.

Así pues, nuestro trabajo permite identificar los sectores y las profundidades a las que se podría producir el proceso activo de fracturación por sobrepresión y la recirculación de fluidos calientes, lo que a su vez facilita la migración de estos últimos hacia sectores de menor presión donde se favorecerían las condiciones para la precipitación de metales. Por desgracia, el mecanismo es lento y se produce a grandes profundidades. Sin embargo, los procesos tectónicos que desencadenan la exhumación y la erosión de estos sectores profundos pueden, a lo largo de millones de años, sacar a superficie los niveles mineralizados. Como consecuencia, estas zonas constituyen regiones de interés para la exploración minera. El estudio de la sismicidad inducida por presión de fluidos puede así contribuir a mejorar nuestro conocimiento sobre la relación entre los terremotos y la localización de yacimientos minerales en zonas profundas de la corteza.

Javier Fernández-Lozano *investiga en la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas de la Universidad de León.*

PARA SABER MÁS

Large-scale distributed deformation-controlled topography along the western Africa–Eurasia limit: Tectonic constraints. Gerardo de Vicente y Ramón Vegas en *Tectonophysics*, vol. 474, págs. 124-143, septiembre de 2009.

New insights into the lateral-strength variations and depth to the brittle-ductile transition zone in NW Iberia. Javier Fernández-Lozano et al. en *Tectonics*, vol. 40, págs. 1-14, enero de 2021.

Colloidal transport and flocculation are the cause of hyperenrichment of gold in nature. Duncan F. McLeish et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, págs. 1-6, mayo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Terremotos en la corteza continental estable. Arch C. Johnston y Lisa R. Kanter en *IyC*, mayo de 1990.

Resolución de la paradoja de los terremotos profundos. Harry W. Green en *IyC*, mayo de 2004.

Tectónica de placas en directo. Marc Boada Ferrer en *IyC*, mayo de 2021.

FÍSICA

Una conexión inesperada entre la física de partículas y la inteligencia artificial

Un nuevo resultado permite usar la teoría cuántica de campos para describir algoritmos de aprendizaje automático. El hallazgo ofrece una nueva vía para entender la inteligencia artificial, así como para investigar los fundamentos matemáticos de la propia teoría de campos

DIMITRIOS BACHTIS



GETTY IMAGES/SYLVERARTS/ISTOCK

LA TEORÍA DE GRAFOS ha permitido establecer una equivalencia entre ciertos algoritmos de aprendizaje automático basados en redes neuronales y la teoría cuántica de campos, el formalismo usado por los físicos para describir las partículas elementales.

La teoría cuántica de campos es el formalismo empleado por los físicos para describir el comportamiento de las partículas elementales, como electrones, fotones o quarks. Hasta hoy, esta teoría ha demostrado tener un éxito rotundo. Por recordar un ejemplo célebre, el cálculo del momento magnético del electrón ha conducido a la verificación experimental más precisa de una predicción teórica en toda la historia de la ciencia.

Desde sus inicios hace unos 90 años, la teoría cuántica de campos fue concebida para dar cuenta de la naturaleza a su nivel más fundamental: el de las partículas elementales y sus campos cuánticos correspondientes. Pero ¿podría este formalismo resultar igualmente exitoso a la hora de describir un comportamiento «emergente»; es decir, el tipo de fenómenos colectivos que surgen cuando muchos constituyentes básicos interactúan entre sí?

Un ejemplo típico de esta clase de comportamiento nos lo proporciona el cerebro humano. Aunque este se compone de elementos simples (neuronas) que interactúan entre sí mediante reglas relativamente sencillas, esas interacciones dan rápidamente lugar a fenómenos colectivos genuinamente nuevos. Estos surgen en última instancia de las interacciones entre neuronas, pero afectan el cerebro como un todo. Por tanto, podemos preguntarnos si es posible concebir una teoría física que describa con precisión esta clase de fenómenos colectivos.

En un trabajo reciente realizado por nuestro grupo de la Universidad de Swansea y publicado el pasado mes de abril en *Physical Review D*, hemos descubierto una sorprendente relación entre ciertas teorías cuánticas de campos y algunos algoritmos de aprendizaje automático. En concreto, hemos demostrado que algunas redes neuronales y otros sistemas de inteligencia artificial pueden describirse directamente mediante modelos computacionales de teorías cuánticas de campos. Este inesperado resultado allana el camino para estudiar el aprendizaje automático mediante el formalismo de la

Imagen original

Proceso de reconstrucción

(*a*) Tras 1 paso (*b*) 10 pasos (*c*) 50 pasos

REINTERPRETAR EL APRENDIZAJE: Este algoritmo es capaz de aprender una imagen dada (*izquierda*) y, posteriormente, comenzar con un conjunto aleatorio de píxeles (*derecha, a*), reordenarlos y construir a partir de ellos una versión fiel de la imagen original (*derecha, c*). Es posible demostrar que este algoritmo es equivalente a una teoría cuántica de campos. En términos de esta última, todo el proceso algorítmico puede reinterpretarse como un sistema físico que alcanza una configuración de equilibrio.

CORTESÍA DE DIMITRIOS BACHTIS

teoría de campos, al tiempo que proporciona una nueva y prometedora vía para investigar los fundamentos matemáticos de la propia teoría de campos.

Espaciotiempo y superordenadores

La conexión entre la teoría de campos y la inteligencia artificial tiene su origen en cierto formalismo usado en física de partículas y conocido como «teoría de campos en el retículo» (*lattice field theory*). Este marco se desvía del usado mayoritariamente en física de partículas, y su característica principal reside en que modeliza el espacio y el tiempo como si estuvieran formados por «píxeles» de tamaño finito. Esta forma de tratar el espaciotiempo tiene la ventaja de que logra mantener bajo control las ecuaciones que deben resolverse. Sin embargo, exige resolver un número gigantesco de ellas, lo que implica que solo puede llevarse a cabo con la ayuda de potentes superordenadores.

A pesar de que esta técnica computacional en física de partículas se remonta a la década de 1970, ha sido solo en los últimos años, gracias a la llegada de los superordenadores modernos, cuando ha conseguido aumentar su precisión. En la búsqueda de métodos para acelerar aún más estos exigentes cálculos, el aprendizaje automático ha sido propuesto como una de las posibles soluciones.

Uno de los métodos de aprendizaje automático más usados en la teoría de campos en el retículo es el basado en redes neuronales. Una red neuronal no es más que un conjunto de nodos («neuronas») interconectados por enlaces. Desde un punto de vista matemático, tales redes pueden describirse mediante un grafo: la representación abstracta de un conjunto de vértices conectados entre sí por aristas. Si identificamos cada vértice con una variable de cierto tipo, las aristas que conectan distintos vértices introducen una forma de dependencia entre las variables correspondientes.

Un aspecto clave es que tales estructuras basadas en grafos se usan también en la teoría de campos en el retículo; en concreto, para representar un campo cuántico en un espaciotiempo discreto, o «pixelado». Gracias a este paralelismo, resulta posible encontrar un lenguaje matemático común para describir tanto el aprendizaje automático como la teoría de campos en el retículo.

Localidad y amnesia

Dicho lenguaje matemático común se conoce en términos técnicos con el nombre de «campos aleatorios de Márkov». De manera simplificada, este formalismo describe un conjunto de variables aleatorias, cada una de las cuales puede identificarse con los nodos de un grafo. Tales variables han de satisfacer la llamada «propiedad de Márkov», así denominada en honor al matemático ruso del siglo XIX Andréi Márkov. Esta propiedad establece que los eventos que ocurren en una determinada región del grafo han de ser independientes de los que suceden en las zonas alejadas.

La propiedad de Márkov está relacionada con una característica conocida como «amnesia» (*memorylessness*): el hecho de que el estado de un sistema solo depende de lo que ha ocurrido en el instante anterior, pero no de aquellos acontecimientos que sucedieron más lejos en el pasado. En algunos algoritmos de aprendizaje automático, como los usados en el tratamiento de imágenes, esta propiedad de Márkov se emplea para descubrir estructuras locales en las imágenes.

En el contexto de los campos cuánticos, la condición de Márkov puede aparecer debido a la discretización del espaciotiempo. En este caso, la propiedad de Márkov equivale a la condición de localidad: el conocido principio físico que impone que los sucesos que ocurren en una determinada región del espaciotiempo solo pueden verse afectados por los acontecimientos cercanos, pero no por aquellos que suceden en puntos lejanos (es decir; el mismo principio que prohíbe la existencia de acciones instantáneas entre puntos distantes del espaciotiempo).

Todos estos paralelismos permiten anticipar una relación entre la teoría cuántica de campos y el aprendizaje automático. En nuestro trabajo, hemos establecido que este es efectivamente el caso al demostrar que ciertas teorías de campos satisfacen cierto teorema conocido como «teorema de Hammersley-Clifford». Este garantiza rigurosamente que dichas teorías de campos satisfacen la condición de Márkov y que, por tanto, pueden reformularse en términos de algoritmos de aprendizaje automático.

Campos cuánticos que aprenden

Nuestro resultado abre la posibilidad de emplear las teorías de campos para derivar nuevos algoritmos de aprendizaje automático para tareas concretas, como la segmentación de imágenes (el proceso de dividir una imagen en diferentes partes, como las áreas claras y oscuras de una fotografía en blanco y negro, por ejemplo). Esto es posible porque las propiedades físicas de los campos cuánticos, como su tendencia a minimizar la energía y otras cantidades, se corresponden con los procesos de optimización usados en el aprendizaje automático.

Por ejemplo, en nuestro trabajo hemos demostrado la equivalencia entre cierta teoría cuántica de campos y un algoritmo al que es posible entrenar para que aprenda una imagen. Tras el entrenamiento, si al algoritmo se le da un conjunto aleatorio de píxeles, los reordenará hasta llegar a una «configuración de equilibrio» que reproduce fielmente la imagen original.

Esta equivalencia entre algoritmos y teorías de campos podría dar lugar a nuevas ideas en inteligencia artificial. Por ejemplo, hace tiempo que se sabe que algunos algoritmos pueden relacionarse con la descripción matemática de ciertos sistemas físicos, como los llamados «vidrios de espín» (una línea de investigación que inició el físico italiano Giorgio Parisi y que este año se ha visto reconocida con la concesión del premio Nobel de física). Nuestros resultados podrían arrojar luz sobre cómo interpretar esos algoritmos de aprendizaje automático, los cuales pueden ahora investigarse con las herramientas propias de la teoría de campos.

Al respecto, sería interesante explorar las posibles transiciones de fase en aquellos algoritmos que tienen un equivalente en teoría cuántica de campos. En física, una transición de fase describe un cambio brusco en las propiedades de un sistema, como cuando el agua hierve y se convierte en vapor. Hace años que se sabe que, durante una transición de fase, algunos sistemas físicos muy distintos acaban obedeciendo las mismas leyes, en cuyo caso decimos que pertenecen a la misma «clase de universalidad». Este es un concepto muy potente en física que permite entender mucho mejor las propiedades de un sistema. Ahora, podemos explorar si aquellos algoritmos que son equivalentes a teorías de campos experimentan transiciones de fase durante su proceso de entrenamiento, y, en tal caso, a qué clase de universalidad pertenecen.

Aprender sobre campos cuánticos

Además de usar la física para entender mejor la inteligencia artificial, nuestros resultados también abren la puerta a usar el aprendizaje automático para aplicaciones físicas; por ejemplo, para aproximar teorías de campos intrincadas mediante otras más sencillas. Hoy por hoy, las aplicaciones del aprendizaje automático a la teoría de campos pueden considerarse aún en sus inicios, por lo que esta equivalencia podría inspirar líneas de investigación totalmente nuevas.

Por último, esta conexión entre la física fundamental y el aprendizaje automático puede relacionarse con una cuestión muy profunda y hasta ahora no resuelta: ¿cuáles son los fundamentos matemáticos de la teoría cuántica de campos?

En las últimas décadas, esta pregunta se ha explorado desde múltiples perspectivas. Una de ellas es la conocida como «teoría cuántica de campos constructiva», una parte de la cual estudia la cuestión desde el punto de vista de los campos aleatorios de Márkov. Por tanto, esta conexión entre la teoría de campos y el aprendizaje automático abre la oportunidad de iniciar un diálogo en la intersección de la física, la computación y las matemáticas; uno que podría acabar transformando las tres disciplinas.

Dimitrios Bachtis *es físico teórico del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Swansea.*

PARA SABER MÁS

Construction of quantum fields from Markoff fields. Edward Nelson en *Journal of Functional Analysis*, vol. 12, págs. 97-112, enero de 1973.
Spin glass theory and beyond: An introduction to the replica method and its applications. Marc Mézard, Giorgio Parisi y Miguel Ángel Virasoro. World Scientific, 1987.
Quantum field-theoretic machine learning. Dimitrios Bachtis, Gert Aarts y Biagio Lucini en *Physical Review D*, vol. 103, art. 074510, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Problemas físicos con muchas escalas de longitud. Kenneth G. Wilson en *IyC*, octubre de 1979.
Quarks por ordenador. Donald H. Weingarten en *IyC*, abril de 1996.
Las leyes del azar y el libre albedrío. Bartolo Luque en *IyC*, junio de 2021.
El misterio del muon. Lucius Bushnaq, Gregorio Herdoíza y Marina Krstić Marinković en *IyC*, junio de 2021.

INMUNOLOGÍA

El cerebro puede recordar y reactivar respuestas inmunitarias antiguas

El cerebro no solo ayuda a regular las reacciones inmunitarias, sino que también almacena y recupera «recuerdos» de ellas

ESTHER LANDHUIS

Los perros que oyen repetidamente una campana a la hora de comer generan una respuesta condicionada y salivan al escuchar el sonido de un simple tañido, según demostró el fisiólogo Iván Pávlov en la década de 1890. El cerebro de los animales aprende a asociar la campana con la comida y ordena a las glándulas salivales a reaccionar en consecuencia.

Más de un siglo después, en un artículo publicado recientemente en *Cell*, la neuroinmunóloga Asya Rolls ha demostrado un tipo de condicionamiento similar en las respuestas del sistema inmunitario. Mediante técnicas genéticas de última generación, ella y su equipo del Technion-Instituto Tecnológico de Israel, en Haifa, identificaron en ratones neuronas del cerebro que se activaban cuando les inducían experimentalmente una inflamación en el abdomen. A continuación demostraron que, cuando volvían a estimular esas neuronas, los

HAZ DE NEURONAS EN EL TUBO DIGESTIVO. Las señales neuronales transmitidas desde el cerebro, que reflejan «recuerdos» de respuestas inmunitarias pasadas, pueden desencadenar nuevos brotes de inflamación localizados en el intestino, según una nueva investigación.

ratones desarrollaban los mismos tipos de inflamación.

«Se trata de un trabajo extraordinario», afirma Kevin Tracey, neurocirujano y presidente de los Institutos Feinstein de Investigación Médica, en Manhasset (Nueva York). Revela «que el concepto clásico de memoria inmunitaria puede representarse en las neuronas». Otros investigadores antes que Rolls ya habían sugerido que el cerebro podía recordar y reproducir respuestas inmunitarias, añade, pero «ella lo ha demostrado».

Ruslan Medzhitov, inmunólogo de la Escuela de Medicina de Yale en New Haven (Connecticut), considera que la nueva investigación es «muy estimulante», porque amplía el conocimiento en el campo y desafía conceptos clásicos.

Reacciones psicosomáticas

Décadas de investigación y experiencias cotidianas ofrecen ejemplos sorprendentes de la interacción entre la mente y el cuerpo. Más o menos en la época en la que Pávlov experimentaba con perros que babeaban, el médico estadounidense John Mackenzie observó cómo a una de sus pacientes le picaba la garganta y le costaba respirar al ver una rosa artificial; la simple creencia de que había polen era suficiente para provocar sus síntomas de alergia.

En la década de 1970, los científicos descubrieron un fenómeno similar al realizar en ratas experimentos de aversión al sabor: les administraron repetidamente un fármaco inmunodepresor junto con un edulcorante sintético, la sacarina; finalmente, descubrieron que podían reducir la actividad inmunitaria de los animales solo con la sacarina. Muchos de nosotros podemos recordar momentos en los que el mero olor de un alimento que nos había indispuesto podía desencadenarnos de nuevo náuseas.

Sin embargo, el mecanismo responsable de estas reacciones psicosomáticas siempre ha sido un misterio. Tales experiencias «no pueden estar regidas por la memoria inmunitaria tal y como la conocemos», afirma Rolls. Más bien parece que estas respuestas inmunitarias se inician en el cerebro, explica. «De alguna manera, ciertos pensamientos inician procesos fisiológicos reales.»

En los últimos años, el laboratorio de Rolls ha comenzado a entender el modo en que los pensamientos y las emociones podrían influir en la salud física. En 2018, ella y sus colaboradores demostraron que, cuando estimulaban las neuronas de los centros cerebrales del placer en ratones que tenían tumores, se desactivaba en ellos un subconjunto de células inmunitarias que suprimen las defensas del cuerpo; en esos animales, el crecimiento del tumor se frenó. Por otro lado, en un estudio publicado el pasado mayo, su equipo descubrió que la activación de ciertos nervios del colon impedía que las células inmunitarias de la sangre entraran en el tejido, lo que ofrecía un mecanismo de control cerebral sobre la inflamación local.

INNERSPACE IMAGING/SCIENCE SOURCE

Interpretar el sistema inmunitario

Dado que estos grupos de neuronas regulan la actividad inmunitaria con tanta precisión, Rolls no concebía que el cerebro pudiera intervenir sobre un sistema sin conocer su estado. «Así que nos propusimos averiguar de qué modo el cerebro interpreta el estado del sistema inmunitario», explica.

Su equipo se centró en la corteza insular, o ínsula, una estructura profunda del cerebro que procesa el dolor, las emociones y las sensaciones físicas internas del cuerpo. «Tenía mucho sentido que el sistema inmunitario participara en esta información interoceptiva», comenta Rolls.

Para averiguar si así era, los investigadores añadieron una sustancia al agua que bebían ratones de laboratorio para provocarles un ataque de colitis de una semana de duración. El producto alteró el revestimiento interno del colon y desencadenó una oleada de células inmunitarias que se dirigió a la zona dañada, una respuesta que luego se descontroló de forma nociva. Una modificación genética en los ratones permitió a Rolls y a su equipo etiquetar con fluorescencia las neuronas activas el día en que la inflamación alcanzó su punto máximo, lo que hizo iluminar las células de la ínsula. Después utilizaron una segunda técnica genética para introducir en esas células un interruptor molecular que les permitía activarlas y desactivarlas a su voluntad.

Varias semanas después de que la colitis remitiera y los ratones se recuperaran, los investigadores utilizaron el interruptor molecular para reactivar las neuronas y provocar en el colon una respuesta inflamatoria similar. Cuando indujeron en ratones otra enfermedad inflamatoria, la peritonitis, observaron resultados parecidos en el revestimiento de la cavidad abdominal.

Las respuestas inmunitarias desencadenadas por la estimulación neural «recordaban a las originales» de la enfermedad, comenta Rolls. Las similitudes se extendieron al nivel molecular: en los ratones con peritonitis inducida, los leucocitos portadores de una proteína receptora específica se volvieron más abundantes en el revestimiento abdominal tanto durante la inflamación original como en la evocada posteriormente.

Los investigadores también observaron el efecto contrario: cuando inhibían el conjunto inicial de neuronas activadas, los síntomas de la enfermedad de los animales no resultaban tan graves. Esto indica que, incluso durante la inflamación inducida químicamente, las señales del cerebro pueden ayudar a controlar su gravedad.

En una serie de experimentos de cartografía nerviosa, el equipo determinó que las neuronas de la ínsula que se activaban durante la inflamación inicial «presentan, de hecho, una vía para hacer llegar un mensaje hasta el colon», explica Rolls.

Una calle de doble sentido

En opinión de Tracey, la nueva investigación demuestra que «no puede separarse el estado de la actividad neuronal del de la actividad del sistema inmunitario. Es una calle de doble sentido».

En 2002, Tracey y sus colaboradores irrumpieron en este campo con el descubrimiento de que el cerebro puede enviar señales antiinflamatorias a otras partes del cuerpo a través del nervio vago. Esta línea de investigación ha avanzado hasta el punto de que se están desarrollando y estudiando dispositivos bioelectrónicos para controlar la inflamación en la artritis reumatoide, la hipertensión pulmonar y otras enfermedades.

Sin embargo, a diferencia del sistema nervioso vagal, las neuronas de la ínsula descritas por Rolls perciben la inflamación, recuerdan ese estado inmunitario y pueden reactivarlo, un comportamiento que se parece más al condicionamiento pavloviano que a una respuesta de retroalimentación negativa, opina Medzhitov. Según Tracey, el nervio vago es como el sistema de frenado y marcha en un coche. El estudio de Rolls demuestra que «existe un conductor, alguien que decide si pisa el freno o el acelerador».

No obstante, como Rolls y sus colaboradores señalan en su artículo, aún no pueden afirmar si el «recuerdo» de la inflamación por las neuronas de la ínsula describe de algún modo la respuesta inmunitaria en sí misma; o si, por el contrario, corresponde a un registro de las sensaciones de los tejidos corporales inflamados (es decir, el recuerdo de lo que se sintió al estar enfermo con esa inflamación). Tampoco pueden descartar que otras partes del cerebro intervengan también en el recuerdo de la respuesta inmunitaria. Lo que sí demuestra el estudio es que «esta información se codifica, aunque no se experimente conscientemente», apunta Medzhitov.

La investigación podría tener implicaciones de gran alcance. El equipo describe una vía anatómica que vincula «el propio estado emocional con la inflamación del colon, lo que es probablemente la mejor demostración que existe hoy sobre el control psicosomático», opina Medzhitov.

Los resultados del nuevo estudio también ponen en entredicho la visión descendente que tenemos sobre el funcionamiento del cerebro. «La mayoría de la gente tiende a pensar que somos muy inteligentes, que decidimos lo que hay que hacer y luego ordenamos a nuestro cuerpo que lo haga», comenta Tracey. «Pero el sistema nervioso no funciona así.» En lugar de ello, el cerebro recibe e integra la información sobre los cambios en el cuerpo, como una infección o fiebre, y da una respuesta en consecuencia.

El trabajo de Rolls demuestra que «el cerebro es inseparable del sistema inmunitario», concluye Tracey. «Creo que tanto los inmunólogos como los neurocientíficos van a estar entusiasmados y sorprendidos.»

***Esther Landhuis**, doctora en inmunología por la Universidad Harvard, es periodista científica especializada en biomedicina.*

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

The inflammatory reflex. Kevin J. Tracey en *Nature*, vol. 420, págs. 853-859, diciembre de 2002.
Modulation of anti-tumor immunity by the brain's reward system. Tamar L. Ben-Shaanan et al. en *Nature Communications*, vol. 9, artículo n.º 2723, julio de 2018.
The self in context: brain systems linking mental and physical health. Leonie Koban et al. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 22, págs. 309-322, marzo de 2021.
Insular cortex neurons encode and retrieve specific immune responses. Tamar Koren et al. en *Cell*, 8 de noviembre de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Medicina bioelectrónica. Kevin J. Tracey en *IyC*, junio de 2015.
La maquinaria celular de la inflamación. Wajahat Z. Mehal en *IyC*, febrero de 2016.
El estrecho nexo entre la inmunidad y el cerebro. Jonathan Kipnis en *IyC*, octubre de 2018.

MATEMÁTICAS

Categorías inf

Los matemáticos han ampliado el que posiblemente fuese el concepto más general y abstracto de toda la disciplina

Emily Riehl

Ilustración de portada de Eric Petersen

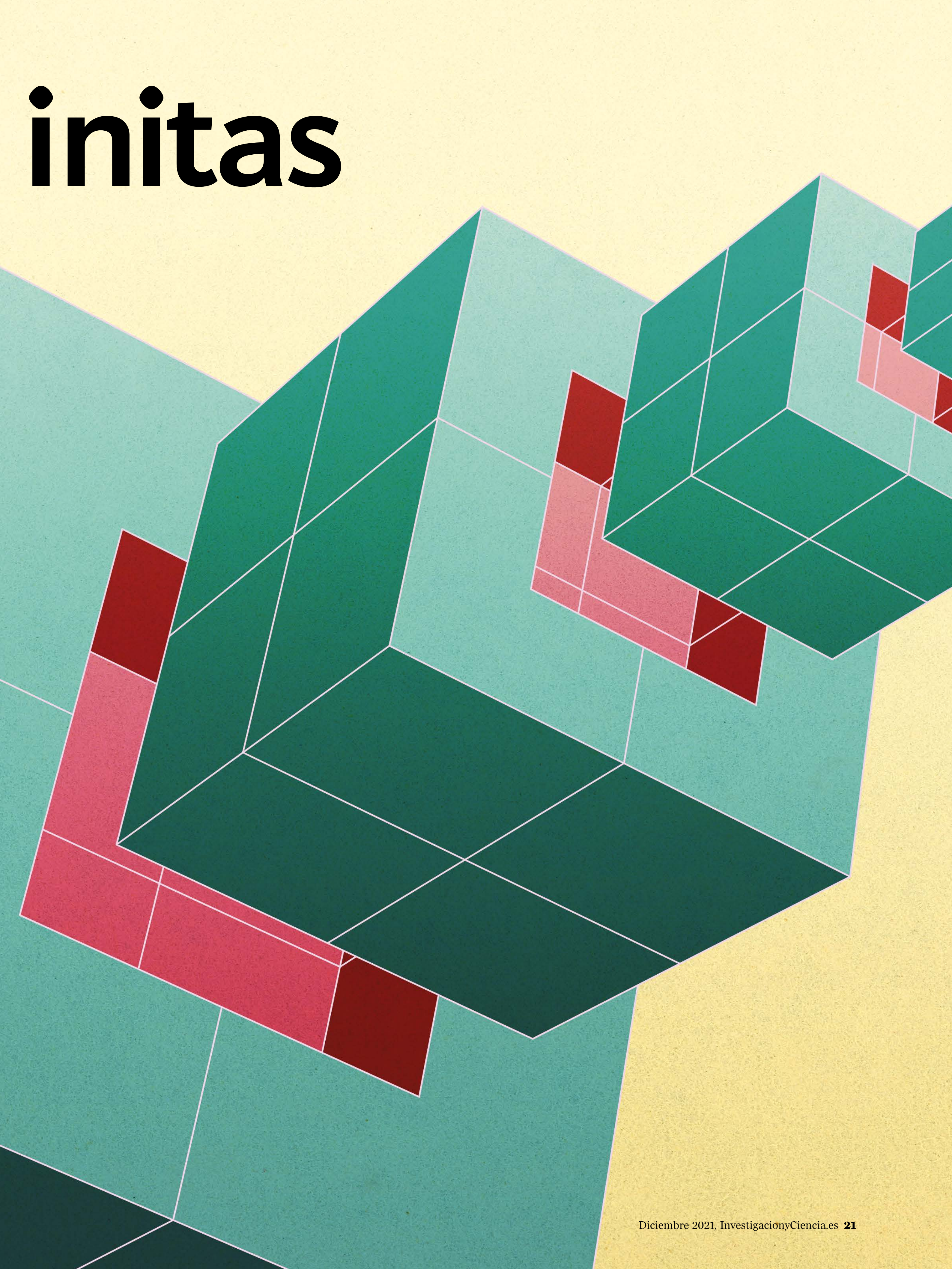
Esquemas de Matteo Farinella

EN SÍNTESIS

A lo largo de la historia, el progreso matemático ha sido posible gracias a la generación de conceptos cada vez más amplios y abstractos, los cuales retienen las propiedades esenciales de los conceptos del nivel inferior.

En el siglo XX, esta manera de proceder dio lugar a la teoría de categorías, donde cada objeto matemático se define en virtud de sus relaciones con otros objetos. Este enfoque ha permitido demostrar todo tipo de resultados en diversas áreas.

Una nueva vuelta de tuerca a esta idea ha iniciado el campo de las categorías infinitas. Gracias a esta nueva disciplina, los investigadores han comenzado a desentrañar conexiones inesperadas entre complejos conceptos matemáticos.


initas

Emily Riehl es matemática en la Universidad Johns Hopkins, donde trabaja en la teoría de categorías y en los fundamentos de las categorías infinitas. Su libro *Elements of ∞-category theory*, escrito junto a Dominic Verity, será publicado 2022 por Cambridge University Press.





Un fresco día de otoño en Nueva Inglaterra, durante mi tercer año de universidad, caminaba por delante de una boca de metro cuando un problema de matemáticas atrajo mi atención. Un hombre se encontraba junto a unos cuantos acertijos que había garabateado en la pared. Uno de ellos pedía construir, con una regla y un compás imaginarios, un cubo con el doble de volumen que otro cubo dado.

Me paré en seco. Ya había visto ese problema antes. De hecho, es un reto con más de dos milenios en el que intervino Platón, de acuerdo con Plutarco. Podemos usar una regla para extender un segmento en cualquier dirección y un compás para dibujar un círculo de cualquier radio desde el centro que elijamos. La clave de este rompecabezas es que cualquier punto o longitud que aparezca en el dibujo final debe estar presente desde el principio o poder construirse a partir de la información suministrada.

Para duplicar el volumen de un cubo, partimos de la longitud de sus lados. En este caso podemos considerar que es 1, porque es la única medida relevante. Para construir el cubo más grande, hay que hallar el modo de dibujar una de sus caras con la nueva longitud requerida, que es $\sqrt[3]{2}$, sin más herramientas que la regla y el compás.

Se trata de un problema difícil. Durante más de dos mil años, nadie consiguió resolverlo. Por fin, en 1837, Pierre Laurent Wantzel explicó por qué nadie lo había logrado: según demostró, era imposible. Su prueba utilizó matemáticas avanzadas para la época y cuyas bases había sentado su contemporáneo francés Évariste Galois, quien murió a los 20 años en un duelo posiblemente relacionado con una desdichada relación amorosa. A mis 20 años, mis logros matemáticos eran mucho menos impresionantes, pero al menos entendía la prueba de Wantzel.

La idea es la siguiente: dado un punto como origen y una distancia de longitud 1, es relativamente fácil usar la regla y el compás para construir todos los puntos de una recta numérica cuyas coordenadas sean los números racionales (ignorando, como acostumbran a hacer los matemáticos, la imposibilidad práctica de representar infinitos puntos en un tiempo finito).

Wantzel demostró que, si empleamos solo esas herramientas, cada nuevo punto que construyamos será una solu-

ROMPECABEZAS DEL METRO

Paso 1: Usar el compás para marcar una distancia de 1.

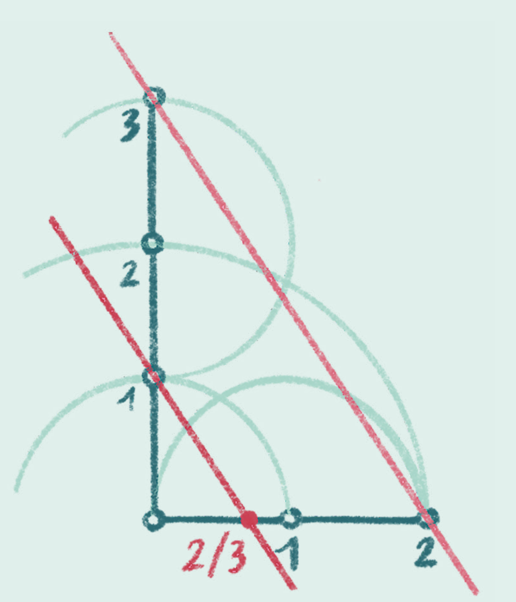
Paso 2: Usar el compás con la misma apertura para marcar una distancia de 2.

Paso 3: Construir una línea perpendicular que pase por el punto 0, usando el compás para determinar la perpendicularidad, y marcar puntos en ese eje empleando los pasos 1 y 2.

ción de una ecuación cuadrática del tipo $ax^2 + bx + c = 0$, cuyos coeficientes a, b y c forman parte de los puntos previamente construidos. En cambio, el punto $\sqrt[3]{2}$ es solución de la ecuación cúbica $x^3 - 2 = 0$, y la teoría de Galois sobre las «extensiones de cuerpos» demuestra que nunca pueden obtenerse las raíces de un polinomio cúbico irreducible resolviendo ecuaciones cuadráticas; esencialmente, porque 3 no es divisible por ninguna potencia de 2.

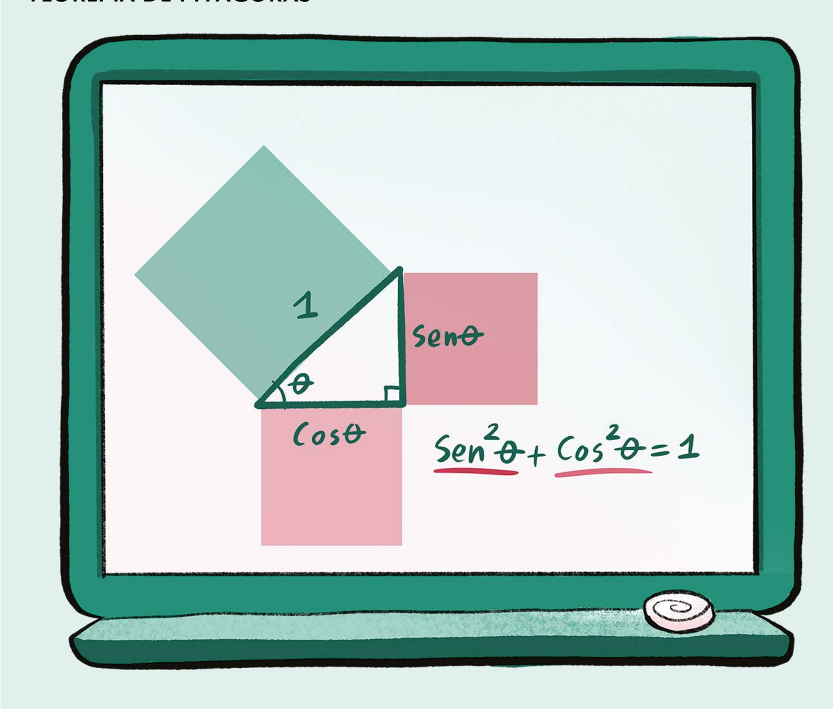
Armada con esos hechos, no pude resistirme y me paré a hablar con el hombre de la calle. Como cabía esperar, mis esfuerzos por explicarle por qué sabía que su problema no tenía solución fueron en balde. Por el contrario, afirmó que mi educación había cerrado mi mente y lastrado mi creatividad. Al final, mi novia consiguió rescatarme de la discusión y seguimos nuestro camino.

Esta anécdota encierra una pregunta interesante: ¿cómo pude yo, una estudiante de tercer año de carrera aún bastante verde, aprender a manipular con soltura sistemas numéricos abstractos como los cuerpos de Galois en tan solo unas semanas? Ese material llegó al final de un curso repleto de grupos de simetría, anillos de polinomios y otros tesoros semejantes que habrían dejado boquiabiertos a gigantes de la talla de Isaac Newton, Gottfried Leibniz, Leonhard Euler o Carl Friedrich Gauss. ¿Cómo logran los matemáticos enseñar en poco tiempo a cada nueva generación de estudiantes hallazgos que asombraron a los expertos de la generación anterior?



Paso 4: Usar una regla para trazar una recta que pase por el punto 2 del eje horizontal y el punto 3 del eje vertical. Usar el compás para dibujar dos líneas perpendiculares, a fin de construir una línea paralela a la anterior entre el punto 1 del eje vertical y el 2/3 del horizontal.

TEOREMA DE PITÁGORAS



Parte de la respuesta tiene que ver con recientes avances matemáticos que proporcionan una «vista de pájaro» del campo valiéndose de niveles de abstracción cada vez mayores. La teoría de categorías es una rama de las matemáticas que explica en qué sentido dos objetos matemáticos distintos pueden considerarse «iguales». Su teorema fundamental nos dice que cualquier objeto matemático, por complejo que sea, queda totalmente determinado por sus relaciones con otros objetos similares. Gracias a la teoría de categorías, enseñamos a los jóvenes matemáticos las ideas más recientes empleando reglas generales aplicables a categorías matemáticas, en vez de profundizar en leyes individuales que solo son válidas en un área concreta.

Conforme han ido evolucionando las matemáticas, los investigadores han ampliado sus ideas de cuándo dos cosas «son iguales». En las últimas décadas, muchos otros investigadores y yo hemos trabajado en una extensión de la teoría de categorías que dé sentido a esta noción ampliada de unicidad. Esas nuevas categorías, denominadas categorías infinitas, o ∞-categorías, expanden la teoría de categorías a infinitas dimensiones. El lenguaje de las ∞-categorías proporciona potentes herramientas para estudiar problemas donde las relaciones entre objetos son demasiado sutiles para definirlas mediante las categorías tradicionales. La perspectiva que se obtiene al «alejarse hasta el infinito» ofrece una forma novedosa de pensar en viejos conceptos y un camino para descubrir otros nuevos.

CATEGORÍAS

Igual que muchos de mis colegas de profesión, me sentí atraída por las matemáticas debido, en parte, a mi mala memoria. Esto desconcierta a mucha gente, que recuerda las matemáticas del instituto como una asignatura repleta de fórmulas que memorizar, como las identidades trigonométricas. Sin embargo, a mí me reconfortaba el hecho de que las fórmulas más usadas podían derivarse a partir de $\text{sen}^2\theta + \cos^2\theta = 1$, la cual posee una elegante explicación geométrica: es la aplicación del teorema de Pitágoras a un triángulo rectángulo con una hipotenusa de longitud 1 y un ángulo agudo de θ grados.

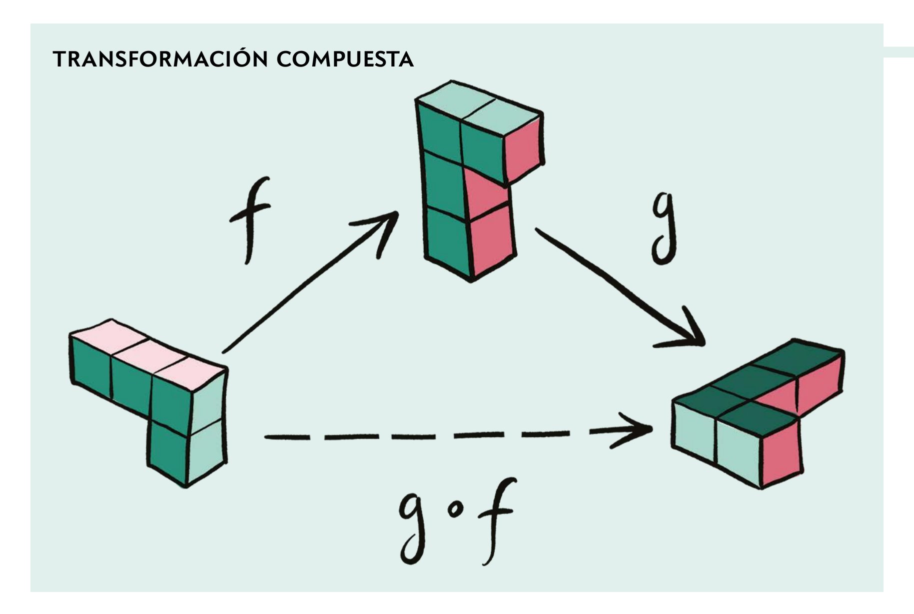
Esa visión utópica de las matemáticas en la que todo «tiene sentido» y no hay que memorizar nada se desmorona hasta cierto punto al llegar a la universidad. En ese momento, los estudiantes se ven expuestos a la selva de objetos matemáticos que han cobrado vida en los últimos

siglos. Los llamados «grupos», «anillos» y «cuerpos» pertenecen a un área de las matemáticas conocida como álgebra. Esta palabra procede de un libro escrito en el siglo IX por el matemático y astrónomo persa Muhammad ibn Musa al-Juarismi y cuyo título suele traducirse como *Compendio de cálculo por reintegración y comparación*. Durante el siguiente milenio, el álgebra pasó de estudiar la naturaleza de las soluciones de las ecuaciones polinómicas a ocuparse de los sistemas numéricos abstractos. Dado que ningún número real x satisface la ecuación $x^2 + 1 = 0$, los matemáticos construyeron un nuevo sistema numérico (los números complejos) añadiendo un «número imaginario» al que bautizaron i y sobre el que impusieron la condición $i^2 + 1 = 0$.

El álgebra es solo una de las asignaturas del plan de estudios de matemáticas. Otras piedras angulares son la topología, que podemos definir como el estudio abstracto del espacio, y el análisis, que comienza con un tratamiento riguroso del cálculo de funciones reales antes de adentrarse en los terrenos más exóticos de los espacios probabilísticos y las variables aleatorias o las variedades complejas y las funciones holomorfas. ¿Cómo va a entender todo eso un estudiante?

Una idea paradójica en matemáticas es la de simplificación a través de la abstracción. Como escribió Eugenia Cheng, científica residente en la Escuela de Arte del Instituto de Chicago, en su libro *El arte de la lógica (en un mundo ilógico)*, «un aspecto poderoso de la abstracción es que muchas situaciones diferentes se vuelven idénticas cuando nos olvidamos de algunos detalles». El álgebra moderna se creó a principios del siglo XX, cuando los matemáticos decidieron unificar sus estudios sobre los muchos ejemplos de estructuras algebraicas que surgían al considerar las soluciones de ecuaciones polinómicas o las configuraciones de figuras en el plano. Para conectar las investigaciones de esas estructuras, identificaron axiomas sobre sus propiedades comunes. Introdujeron los grupos, los anillos y los cuerpos, junto con la idea de que un objeto matemático podía describirse a partir de sus propiedades y explorarse «de modo abstracto», despojado del andamiaje de ejemplos o construcciones particulares.

Es bien sabido que el célebre John Horton Conway reflexionó sobre la curiosa ontología de los objetos matemáticos: «No hay duda de que existen, pero no podemos examinarlos salvo pensando en ellos. Es bastante sorprendente y todavía no lo entiendo, pese a haber sido matemático toda mi vida. ¿Cómo pueden existir las cosas sin estar realmente ahí?».



Pero ese mundo de objetos matemáticos que pueden existir sin estar realmente ahí creó un problema: es demasiado grande para que una persona pueda abarcarlo. Incluso solo dentro del álgebra, hay tantas cosas que estudiar que falta tiempo para entenderlas todas. A principios del siglo XX, los matemáticos empezaron a investigar el «álgebra universal». Este concepto hace referencia a un conjunto (que puede ser una colección de simetrías, de números en algún sistema o de algo totalmente distinto) junto con varias operaciones (como la suma y la multiplicación) que satisfacen una lista de axiomas relevantes (como las propiedades asociativa, conmutativa o distributiva). Haciendo distintas elecciones (¿está una operación parcialmente o totalmente definida?, ¿es invertible?), obtenemos las estructuras algebraicas habituales: los grupos, los anillos y los cuerpos. Pero ello no se ve limitado por estas decisiones, que representan una parte minúscula en un abanico infinito de posibilidades.

Conforme han ido evolucionando las matemáticas, los matemáticos han ampliado su percepción de cuándo dos cosas «son iguales»

La proliferación de nuevos objetos matemáticos abstractos conlleva su propia complejidad. Una manera de simplificarla es introducir un nivel más de abstracción en el que, de forma sorprendente, podemos demostrar teoremas sobre una amplia variedad de objetos matemáticos a la vez, sin especificar exactamente a qué tipo de objetos nos estamos refiriendo.

Eso es justo lo que hace la teoría de categorías. Creada en la década de 1940 por Samuel Eilenberg y Saunders Mac Lane, se introdujo para dar una definición rigurosa del término coloquial «equivalencia natural». Sin embargo, también ofrece una forma de pensar globalmente en el álgebra universal y en otras áreas de las matemáticas. Gracias al lenguaje de Eilenberg y Mac Lane, ahora entendemos que cada variedad de objeto matemático pertenece a su propia categoría. Esta es una determinada colección de objetos, junto con un conjunto de transformaciones entre ellos representadas mediante flechas.

Por ejemplo, el álgebra lineal estudia espacios vectoriales abstractos, como el espacio euclídeo tridimensional. Las transformaciones correspondientes se denominan «lineales», y cada una de ellas tiene un espacio vectorial de origen y otro de destino que indican qué tipos de vectores admite como entradas y cuáles serán las salidas. Al igual que ocurre con las funciones, es posible «componer» las transformaciones de una categoría, lo que significa que podemos aplicar una

transformación a los resultados de otra. Para cualquier par de transformaciones $f\colon A \to B$ (leído como «f es una transformación de A en B») y $g\colon B \to C$, la categoría especifica una única transformación compuesta $g \circ f\colon A \to C$ («f compuesta con g es una transformación de A en C»). Esta ley de composición es asociativa, lo que significa que $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$.

También es «unitaria» (*unital*): cada objeto B tiene una «transformación identidad», denotada por 1_B, con la propiedad de que $g \circ 1_B = g$ y $1_B \circ f = f$ para transformaciones g y f cualesquiera cuyo origen y destino, respectivamente, sea B.

¿Cómo ayudan las categorías al desventurado estudiante que se enfrenta a demasiados objetos matemáticos, sin tiempo suficiente para ocuparse de todos? Cualquier clase de estructuras que podamos definir en el álgebra universal quizá sea distinta a todas las demás. Pero las categorías donde habitan estos objetos son muy similares, en sentidos que es posible expresar con precisión mediante el lenguaje categórico.

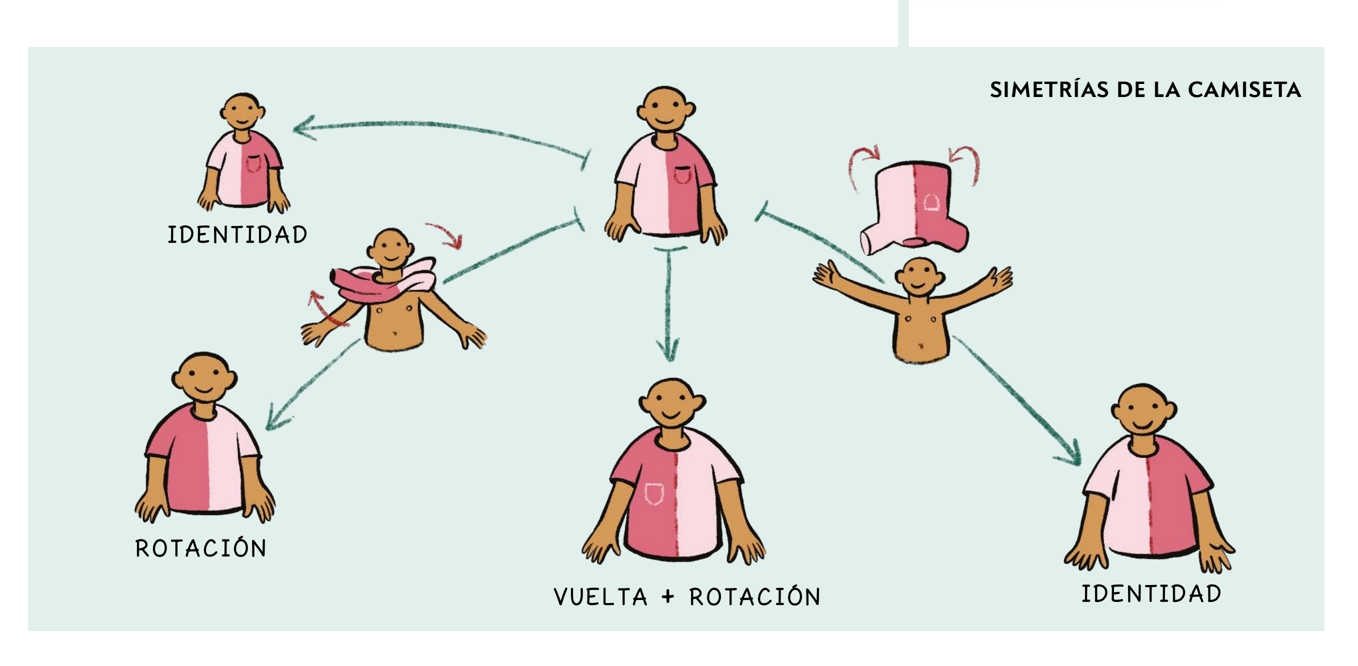
Con suficiente experiencia, los matemáticos pueden saber qué esperar cuando se topan con un nuevo tipo de estructura algebraica. Eso se refleja en los libros de texto modernos, que desarrollan las teorías de grupos, anillos y espacios vectoriales una tras otra, esencialmente porque son paralelas. Existen otras analogías más vagas entre estas categorías y aquellas que los estudiantes se encuentran en los cursos de topología o análisis, y esas semejanzas les permiten asimilar el nuevo material más deprisa. Gracias a tales pautas, los alumnos pueden dedicar más tiempo a explorar los temas especiales que distinguen las distintas subdisciplinas matemáticas. No obstante, los avances en la investigación matemática a menudo se inspiran en nuevas y sorprendentes analogías entre áreas previamente disconexas.

LAS COMPOSICIONES SON ASOCIATIVAS Y UNITARIAS

SIMETRÍAS

Esa cascada de niveles de abstracción (de las estructuras matemáticas concretas a los sistemas axiomáticos y, más allá, hasta los objetos generales que pertenecen a las categorías) plantea un nuevo reto: ya no está muy claro qué significa decir que una cosa «es igual» a otra. Consideremos un grupo, que en matemáticas es una colección abstracta de simetrías. A Amie Wilkinson, de la Universidad de Chicago, le gusta describir estas simetrías como «movimientos» que rotan o voltean un objeto hasta dejarlo en una posición similar a la inicial.

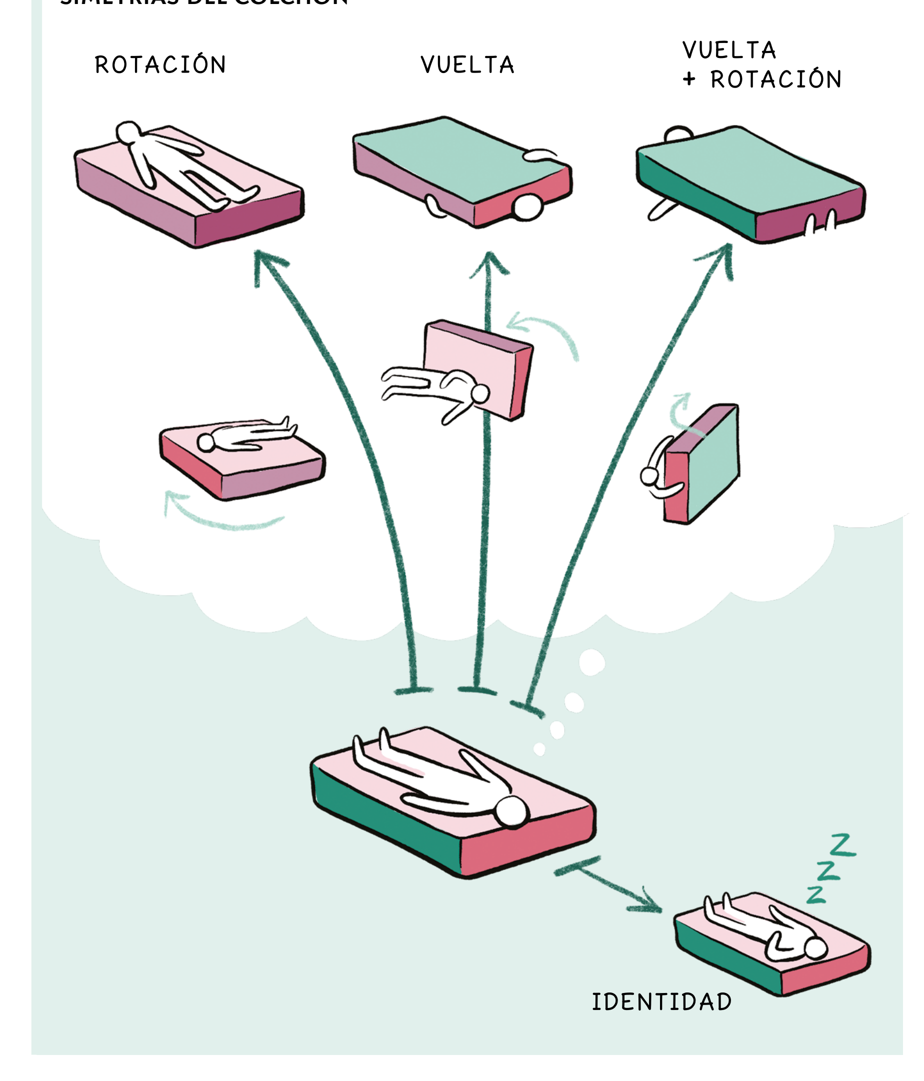
Por ejemplo, podemos examinar las simetrías de una camiseta. Una de ellas es el «movimiento identidad», donde una persona simplemente viste la camiseta de la manera habitual. Otra simetría corresponde al movimiento en que la persona saca los brazos de las mangas y, con la camiseta aún alrededor del cuello, la rota 180 grados e introduce los brazos en las mangas opuestas. Otra simetría está asociada a un movimiento donde la persona se quita la camiseta, le da la vuelta de dentro afuera y se la pone otra vez, de forma que cada brazo pase por la misma manga en la que estaba. Una última simetría combina estos dos movimientos, que pueden realizarse en cualquier orden sin cambiar el resultado final (algo poco habitual en los grupos). Cada uno de estos cuatro movimientos representa una «simetría» porque, tras ejecutarlo, acabamos llevando la camiseta esencialmente del mismo modo que al principio.



Otro grupo sería el que describe las simetrías de un colchón. Además del movimiento identidad, donde el colchón se deja en su posición original, podemos mover el colchón rotándolo de la cabeza a los pies, dándole la vuelta de arriba abajo, o realizando ambos movimientos uno tras otro (los colchones no suelen ser cuadrados, pero si lo fueran, habría más simetrías). Aunque una camiseta no se parece demasiado a un colchón, estos dos grupos de simetrías tienen, en cierto sentido, la misma «forma». En primer lugar, ambos poseen el mismo número de movimientos (cuatro), y podemos asociar cada movimiento del grupo de la camiseta a otro del grupo del colchón, de tal forma que las composiciones de movimientos correspondientes también se correspondan. En otras palabras, es posible emparejar los movimientos de los dos grupos (la identidad con la identidad, la rotación con la rotación, la vuelta con la vuelta, etcétera). En segundo lugar, si tomamos dos movimientos de un grupo y los realizamos sucesivamente, la posición final concordará con la que resulta de realizar los movimientos correspondientes del otro grupo uno detrás de otro. En términos técnicos, decimos que ambos grupos están conectados por un «isomorfismo», una palabra con una etimología (del griego *isos*, «igual», y *morphe*, «forma») más que reveladora.

Podemos definir el concepto de isomorfismo en cualquier categoría, lo que nos permite transportarlo de un contexto matemático a otro. Un isomorfismo entre dos objetos A y B de una categoría viene dado por un par de transformaciones, $f\colon A \to B$ y $g\colon B \to A$, con la propiedad de que las composiciones $g \circ f$ y $f \circ g$ coinciden con las respectivas identidades 1_A y 1_B. En la categoría de los espacios topológicos, la noción categórica de isomorfismo está representada por un par de funciones continuas inversas entre sí. Por ejemplo, existe una deformación continua que nos permitiría transformar una rosquilla sin hornear en una especie de taza de café: el agujero de la rosquilla se convertiría en el asa de la taza, y el interior lo crearíamos haciendo una depresión con el pulgar (para que la deformación sea continua hay que realizarla sin romper la masa, y por eso no podemos hornear la rosquilla antes de acometer el experimento).

¿Cómo logran los matemáticos enseñar en poco tiempo a cada nueva generación de estudiantes hallazgos que asombraron a los expertos de la generación anterior?



Este ejemplo inspiró la broma de que un topólogo no sabe distinguir entre una taza de café y una rosquilla. Como espacios abstractos, ambos objetos son iguales. En la práctica, podríamos decir que muchos topólogos son aún menos observadores, porque es habitual adoptar una convención más flexible respecto a las situaciones en que dos espacios «son iguales» identificando dos espacios que solo son «homotópicamente equivalentes». Este término alude a la noción de isomorfismo en una categoría más exótica, la de homotopía de los espacios topológicos. Una equivalencia homotópica es otro tipo de deformación continua, pero en este caso podemos identificar puntos distintos. Por ejemplo, imaginemos que cogemos un pantalón y acortamos las perneras hasta obtener un minúsculo tanga, otro «espacio» con la misma estructura topológica fundamental (aún conserva dos agujeros para las piernas), a pesar de que la prenda bidimensional original haya quedado reducida a una tira unidimensional. Otra equivalencia homotópica hace que la extensión infinita del espacio euclídeo tridimensional colapse en un único punto mediante una «gran explo-

sión inversa», en la que cada punto vuela al origen con una velocidad proporcional a su distancia a este.

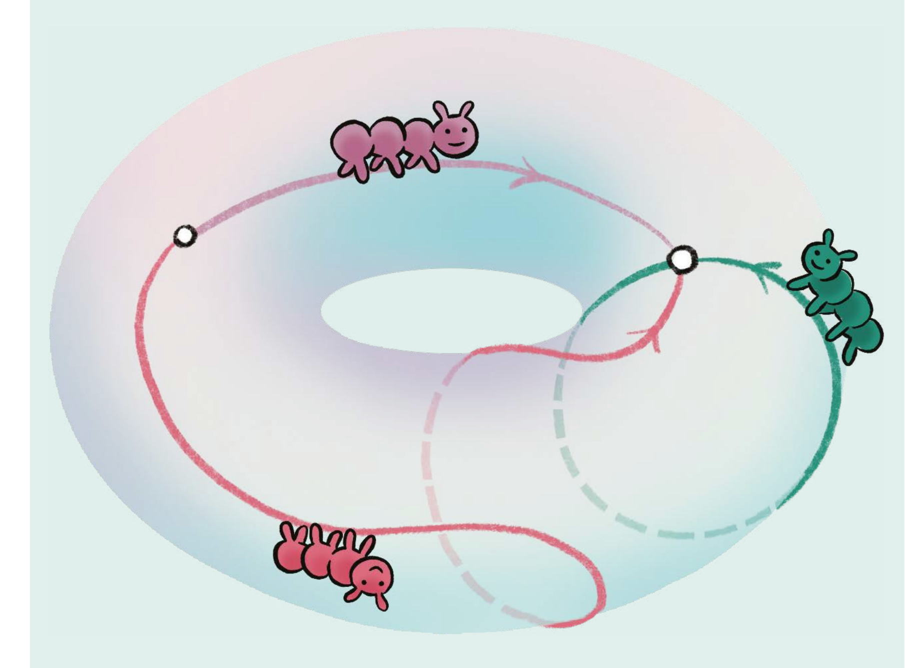
La intuición de que podemos reemplazar un objeto por otro isomorfo sin cambiar la naturaleza fundamental de una construcción o un argumento es tan fuerte que, de hecho, los expertos en categorías han redefinido el artículo «el» para que signifique algo más parecido al «un» del lenguaje coloquial. Por ejemplo, existe un concepto conocido como unión disjunta de dos conjuntos A y B. Al igual que la unión ordinaria, la unión disjunta, $A \sqcup B$, contiene una copia de cada elemento de A y una copia de cada elemento de B. La diferencia es que, si A y B tienen un elemento en común, entonces $A \sqcup B$ posee dos copias de ese elemento: una de ellas recuerda de algún modo que procede de A, y la otra recuerda de algún modo que procede de B.

Hay muchas maneras distintas de construir la unión disjunta a partir de los axiomas de la teoría de conjuntos. Los conjuntos resultantes no serán exactamente iguales, pero siempre serán isomorfos. En vez de perder el tiempo discutiendo sobre qué construcción es más canónica, resulta más práctico dejar de lado esa ambigüedad y referirnos a «la» unión disjunta al considerar cualquier conjunto concreto que satisfaga la propiedad universal buscada. En otro ejemplo, los matemáticos se refieren tanto al grupo de simetrías de la camiseta como al del colchón como «el» grupo de Klein.

CATEGORÍAS DE DIMENSIÓN INFINITA

Según una conocida historia sobre el origen del teorema fundamental de la teoría de categorías, en 1954 un joven matemático llamado Nobuo Yoneda le describió un lema, o teorema auxiliar, a Mac Lane en la estación del Norte de París. Yoneda comenzó a explicarle el lema en el andén y continuó dentro del tren antes de que arrancara. La consecuencia de ese lema es que cualquier objeto de cualquier categoría queda totalmente determinado por sus relaciones con los demás objetos de la categoría, las cuales están dadas por las transformaciones hacia o desde ese objeto. Así pues, podemos caracterizar un espacio topológico X explorándolo con funciones continuas $f\colon T \to X$ definidas en otros espacios T. Por ejemplo, los puntos del espacio X corresponden a funciones continuas $x\colon * \to X$, cuyo dominio es un espacio con un único punto. Y podemos determinar si X es conexo o disconexo considerando funciones $p\colon I \to X$ con el intervalo $I = [0,1]$ como dominio. Cada una de ellas define un «camino» parametrizado en el espacio X que va desde el punto $p(0)$ hasta $p(1)$. Esos caminos pueden verse como las posibles trayectorias de una hormiga que recorre el espacio X.

TRAYECTORIAS DE HORMIGAS EN EL ESPACIO X



Guía rápida de términos matemáticos modernos

Categoría: Colección específica de objetos y de las transformaciones entre ellos, con una regla de composición.

Composición: Aplicación de una transformación a los resultados de otra.

Identidad: Transformación de un objeto en sí mismo que no lo cambia de manera alguna.

Simetría: Transformación invertible de un objeto en sí mismo.

Isomorfismo: Noción estructural de «igualdad» que puede existir entre un par de objetos de una categoría.

Grupoide fundamental: Categoría cuyos objetos son los puntos de un espacio y cuyas transformaciones son los caminos entre ellos, salvo homotopía.

Homotopía: «Camino entre caminos» definido por una deformación continua de un camino a otro.

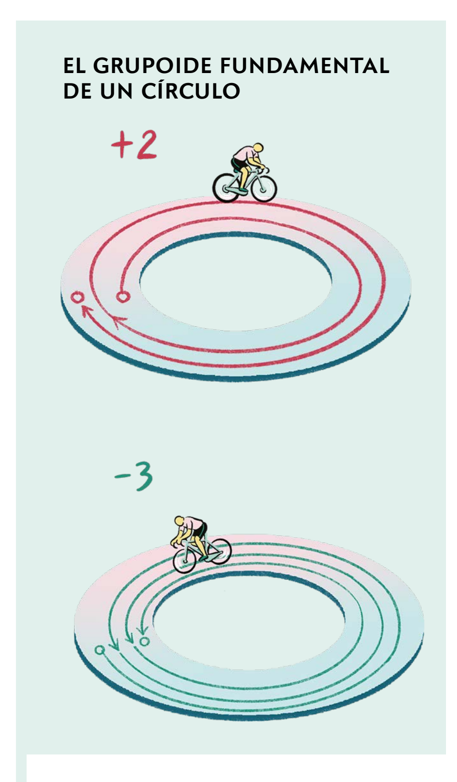
Categoría infinita: Análogo de una categoría en infinitas dimensiones, que añade transformaciones en dimensiones superiores y relaja la regla de composición.

Grupoide infinito fundamental: Categoría infinita de puntos, caminos, homotopías y homotopías superiores de un espacio.

Podemos usar los puntos y caminos de un espacio para convertir los problemas de topología en problemas de álgebra: cada espacio topológico X tiene asociada una categoría $\pi_1 X$, llamada «grupoide fundamental» de X. Los objetos de esta categoría son los puntos del espacio, y las transformaciones son los caminos. Si es posible deformar un camino hasta convertirlo en otro manteniendo fijos los extremos, ambos caminos definen la misma transformación. Estas deformaciones, que se denominan homotopías, son necesarias para que la composición de caminos defina una operación asociativa, uno de los requisitos de una categoría.

Una ventaja clave de la construcción del grupoide fundamental es que es «funtorial» (o «functorial»). Esto significa que una función continua $f\colon X \to Y$ entre espacios topológicos da lugar a una transformación correspondiente $\pi_1 f\colon \pi_1 X \to \pi_1 Y$ entre los grupoides fundamentales. Esta asignación respeta la composición y las identidades; es decir, que $\pi_1(g \circ f) = \pi_1 g \circ \pi_1 f$ y $\pi_1(1_X) = 1_{\pi_1 X}$, respectivamente. Estas dos propiedades, que en conjunto se denominan «funtorialidad», sugieren que el grupoide fundamental incluye cierta

EL GRUPOIDE FUNDAMENTAL DE UN CÍRCULO



información esencial sobre los espacios topológicos. En particular, si dos espacios no son homotópicamente equivalentes, sus grupoides fundamentales son necesariamente no equivalentes.

Sin embargo, el grupoide fundamental no es un invariante completo. Puede distinguir fácilmente entre un círculo y el disco sólido que este encierra. En el grupoide fundamental del círculo, los distintos caminos entre dos puntos pueden etiquetarse con números enteros que registran el número de vueltas que da la trayectoria alrededor del círculo, y un signo + o − que indica, respectivamente, si se recorre en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario. En cambio, en el grupoide fundamental del disco, solo hay un camino (salvo homotopía) entre cualquier par de puntos. Pero el grupoide fundamental del espacio formado por el exterior hinchable de un balón de playa (una esfera en términos topológicos) también posee esta descripción: hay un único camino (salvo homotopía) entre dos puntos cualesquiera.

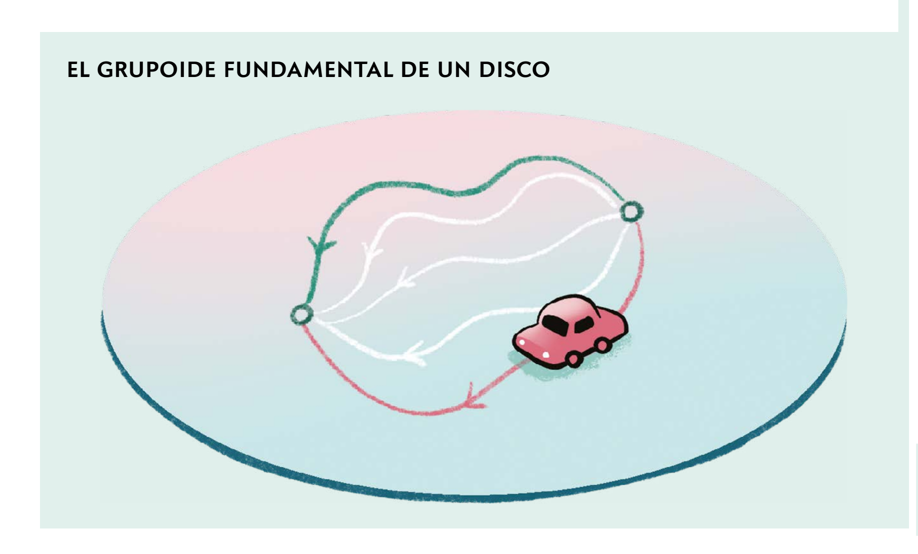
El gran problema del grupoide fundamental es que los puntos y los caminos no detectan la estructura supradimensional de un espacio, porque un punto no tiene dimensiones y un intervalo es unidimensional. Una solución es considerar también las funciones continuas, u homotopías, del disco bidimensional y las «homotopías superiores» (de dimensión superior) definidas por las funciones continuas de la bola sólida tridimensional, así como de otras bolas en 4, 5, 6 o más dimensiones.

Es natural preguntarse qué tipo de estructura algebraica forman los puntos, caminos, homotopías y homotopías superiores de un espacio X: esa estructura, $\pi_\infty X$ («pi infinito X»), denominada el ∞-grupoide fundamental de X, constituye un ejemplo de una ∞-categoría, un análogo en infinitas dimensiones de las categorías que introdujeron Eilenberg y Mac Lane. Al igual que las categorías ordinarias, una ∞-categoría tiene objetos y transformaciones denotadas por flechas unidimensionales, pero también incluye «transformaciones superiores» representadas mediante flechas bidimensionales, tridimensionales, etcétera.

Por ejemplo, en $\pi_\infty X$ los objetos y las flechas son los puntos y los caminos (que ya no se consideran iguales aunque estén relacionados por una deformación continua), mientras que las transformaciones de dimensión superior codifican las homotopías superiores. Como en una categoría ordinaria, es posible componer las flechas para cualquier dimensión fija: si tenemos dos flechas $f\colon X \to Y$ y $g\colon Y \to Z$, también debe haber una flecha $g \circ f\colon X \to Z$. Pero hay una pega: cuando intentamos captar ejemplos naturales, como el ∞-grupoide fundamental de un espacio, es preciso relajar la ley de composición. Para cualquier par de flechas componibles debe existir una flecha compuesta, pero esta ya no es única.

Esa ruptura de la unicidad hace difícil definir las ∞-categorías a partir de los fundamentos clásicos de las matemáticas, que se basan en la teoría de conjuntos, porque ya no podemos pensar en la composición como en una operación similar a las que aparecen en el álgebra universal. Las ∞-categorías revisten cada vez más importancia para la investigación moderna en muchas áreas de las matemáticas, desde la teoría cuántica de campos hasta la geometría y la topología algebraicas. Pero a menudo se consideran «demasiado complicadas» salvo para los especialistas, y no aparecen de forma regular en los planes de estudios, ni siquiera a nivel de posgrado. No obstante, yo y muchos otros vemos las ∞-categorías como una nueva dirección revolucionaria, gracias a la cual los matemáticos podemos soñar con nuevas conexiones que, de otro modo, habrían sido imposibles de enunciar y demostrar rigurosamente.

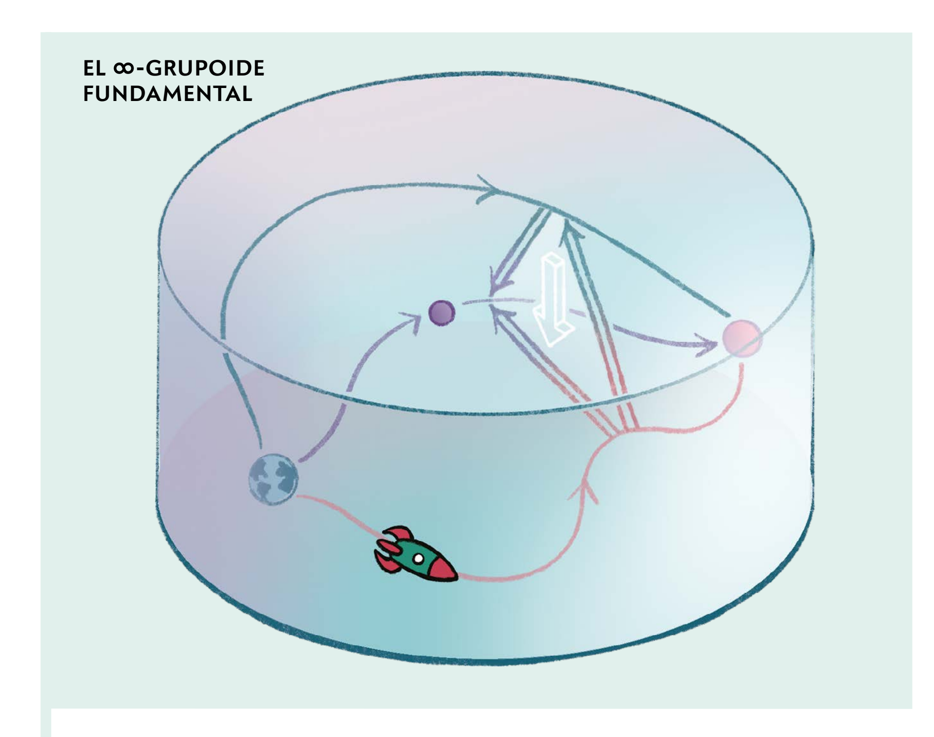
EL GRUPOIDE FUNDAMENTAL DE UN DISCO



EL HORIZONTE FUTURO

Sin embargo, nuestra experiencia pasada sugiere que las matemáticas más exóticas de hoy acabarán considerándose lo bastante sencillas como para enseñarlas en la carrera de matemáticas. Como investigadora en la teoría de ∞-categorías, es divertido especular sobre cómo podría simplificarse esta materia. En este caso, existe un truco lingüístico (una versión más potente del «el» categórico) que podría hacer que las ∞-categorías resultaran tan fáciles de entender para los estudiantes de finales del siglo XXI como lo son en la actualidad las categorías ordinarias.

El axioma clave de estas últimas es la existencia de una única transformación compuesta $g \circ f\colon X \to Z$ para cada par de transformaciones componibles $f\colon X \to Y$ y $g\colon Y \to Z$, elegida de entre todos los elementos del conjunto de transformaciones de X en Z. En cambio, en una ∞-categoría, hay un espacio de flechas que llevan de X a Z, que en el ∞-grupoide fundamental puede entenderse como una suerte



Si las matemáticas son la ciencia de la analogía, del estudio de los patrones, entonces la teoría de categorías es el estudio de los patrones del pensamiento matemático

de «espacio de caminos». El análogo correcto de la unicidad de las composiciones en una categoría ordinaria es la afirmación de que, en una ∞-categoría, el espacio de composiciones es «contráctil». Esto significa que es posible enviar de manera continua cada uno de sus puntos a un único punto de origen por medio de una «gran explosión inversa».

La contractibilidad no implica que exista una única composición: de hecho, como hemos visto en el ∞-grupoide fundamental, puede haber un gran número de caminos compuestos. Pero sí garantiza que dos caminos compuestos cualesquiera son homotópicos, que dos homotopías cualesquiera que relacionen dos caminos compuestos están conectadas por una homotopía superior, y así sucesivamente.

Esta idea de unicidad como un tipo de condición de contractibilidad es esencial en un nuevo sistema de fundamentos para las matemáticas, propuesto, entre otros, por Vladímir Voevodsky. Matemáticos de todo el mundo colaboran en el desarrollo de nuevos «asistentes de demostración» por ordenador, capaces de verificar la prueba formal de un resultado matemático línea a línea. Dichos asistentes poseen un mecanismo que imita una práctica matemática habitual: la de transferir información sobre una cosa a otra que se considera igual a ella a través de un isomorfismo explícito o una equivalencia homotópica. En este caso, el mecanismo permite al usuario transportar una prueba relacionada con un punto de un espacio a lo largo de un camino que lo conecta con cualquier otro punto, lo que proporciona una formulación rigurosa de la noción topológica de igualdad.

En un ensayo de 1974, el matemático Michael Atiyah escribió: «El objetivo de la teoría es, en gran medida, organizar sistemáticamente la experiencia pasada, de tal modo que la siguiente generación —nuestros estudiantes, sus estudiantes, etcétera— puedan asimilar los aspectos esenciales de la manera más sencilla posible. Y esta es la única forma de seguir construyendo acumulativamente cualquier tipo de actividad científica sin acabar llegando a un callejón sin salida». Podría decirse que la teoría de categorías desempeña ese papel en la matemática moderna: si las matemáticas son la ciencia de la analogía, del estudio de los patrones, entonces la teoría de categorías es el estudio de los patrones del pensamiento matemático. Las «matemáticas de las matemáticas», en palabras de Cheng.

Si hoy podemos abarcar tanto material en un curso universitario es porque nuestra comprensión de varios conceptos matemáticos se ha simplificado a través de la abstracción, que podríamos considerar como el proceso de alejarse del problema específico que se está considerando y adoptar una visión más amplia de las matemáticas. Muchos detalles sutiles son invisibles desde ese nivel, como las aproximaciones numéricas o, en realidad, cualquier cosa que tenga que ver con los números. Pero es un hecho notable que los teoremas del álgebra, la teoría de conjuntos, la topología y la geometría algebraica a veces se cumplen por la misma razón subyacente. Y cuando eso ocurre, las demostraciones se expresan en el lenguaje de la teoría de categorías.

¿Qué nos depara el futuro? En ciertas áreas de las matemáticas, se está llegando al consenso de que las ∞-categorías constituyen el hábitat natural de los objetos matemáticos del siglo xxi, del mismo modo que los del siglo xx residen en las categorías ordinarias. La esperanza es que llegue un momento en que la vertiginosa torre de flechas en cada dimensión que se necesitan para trabajar en profundidad en una ∞-categoría quede relegada al subconsciente matemático colectivo, y cada espacio contráctil de opciones colapse en un único punto. Y solo cabe preguntarse: si se han producido tantos avances durante el siglo xx, ¿dónde estarán las matemáticas a finales del xxi? IyC

PARA SABER MÁS

Categorical homothopy theory. Emily Riehl. Cambridge University Press, 2014.
Category theory in context. Emily Riehl. Courier Dover Publications, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las matemáticas a vista de pájaro. Manon Bischoff en *IyC*, septiembre de 2020.



SOSTENIBILIDAD

MÁS COMIDA,



MENOS DESPERDICIOS

Reducir las pérdidas de la cadena alimentaria aumentaría enormemente el suministro de alimentos y mitigaría de forma notable las emisiones de carbono

Chad Frischmann y Mamta Mehra

Gráficos de Valentina D'Efilippo



Chad Frischmann es coautor, investigador principal y creador del Marco de Soluciones del Proyecto Drawdown, un grupo internacional de investigación centrado en la búsqueda de soluciones al cambio climático.

Mamta Mehra es investigadora avanzada en la sección del Proyecto Drawdown dedicada a los usos de la tierra y la alimentación.

IMAGINE QUE VA AL MERCADO Y VUELVE A CASA CON TRES BOLSAS LLENAS DE COMESTIBLES. Antes de llegar a la puerta, se detiene y tira una al contenedor de la basura, que acabará en el vertedero. Menudo despilfarro. Este breve relato describe fielmente el comportamiento colectivo de hoy en día. Entre el 30 y el 40 por ciento de los alimentos destinados al consumo humano que se producen en el planeta acaban desperdiciados. Dado que más de 800 millones de personas pasan hambre a diario, tamaña pérdida nos causa a muchos una profunda congoja.

Si el crecimiento de la población y el desarrollo económico siguen el ritmo actual, en el año 2050 la producción mundial de alimentos habría de aumentar en 53 millones de toneladas, lo cual obligaría a convertir otros 442 millones de hectáreas de bosques y praderas en tierras de cultivo durante los próximos treinta años, una extensión mucho mayor que la de la India. Por si esto no bastara, tal incremento liberaría durante ese lapso el equivalente a 80.000 millones de toneladas más de dióxido de carbono, unas 15 veces las emisiones de toda la actividad económica de Estados Unidos en 2019. El derroche de alimentos ya representa cerca del 8 por ciento de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.

Pero existe otra vía. El grupo del que somos miembros en el Proyecto Drawdown, una organización internacional de comunicación e investigación, ha concluido un riguroso estudio acerca de las prácticas y las tecnologías existentes que permitirían disminuir sensiblemente los gases de efecto invernadero en la atmósfera y, al mismo tiempo, inaugurar un sistema económico y una sociedad más regenerativas. De los 76 medios analizados para alcanzar esos objetivos, reducir el desperdicio alimentario figura entre los cinco primeros. Un ajuste básico en los métodos de producción y en los hábitos de consumo alimentarios podría contribuir a que el mundo entero disfrutara de una alimentación sana y nutritiva hasta después del año 2050 sin necesidad de desbrozar, sembrar o convertir en pastos más terreno que el actual. El aumento del suministro de alimentos que reportaría la supresión del desperdicio, unido al uso de medios de producción más eficientes, evitaría la deforestación y permitiría ahorrar ingentes cantidades de energía, agua, fertilizantes y mano de obra, entre otros recursos.

Cada eslabón de la cadena de abastecimiento que va del campo y la granja a la mesa brinda oportunidades para reducir el derroche. Sembramos cultivos, criamos ganado y transformamos esas materias primas en productos como arroz, aceite vegetal, patatas fritas, zanahorias cortadas, queso o solomillo de ternera. Buena parte se envasa en cajas de cartón, bolsas y botellas de plástico, latas de conserva y tarros de vidrio fabricados en plantas industriales a partir de materiales extraídos de la naturaleza, y luego se transportan por todo el mundo en aviones, trenes y camiones que devoran combustible.

Una vez que llegan a las tiendas y a los restaurantes, los alimentos se conservan en frigoríficos y congeladores ávidos de energía que contienen gases de potente efecto invernadero llamados hidrofluorocarbonos, hasta que los compran los consumidores, a menudo más impulsados por la vista que por

Continúa en la página 37

EN SÍNTESIS

Más del 30 por ciento de los alimentos producidos en el planeta acaban desperdiciados, y es urgente poner fin a semejante despilfarro.

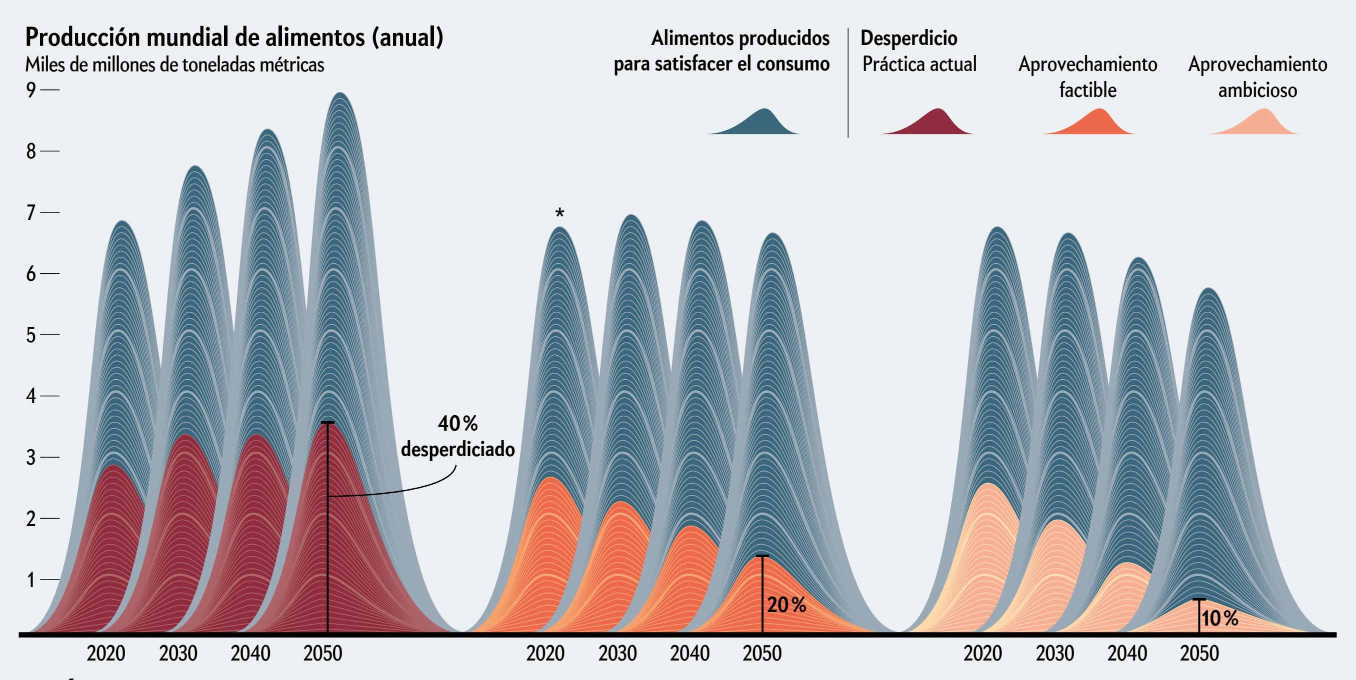
Reducir el derroche no solo resolvería el problema del hambre durante décadas, sino que reportaría amplios beneficios ambientales en forma de ahorro de agua, conservación del suelo cultivable y del medio natural y reducción de los gases de efecto invernadero.

La sostenibilidad a medio y largo plazo de la cadena alimentaria dependerá de la transición a una alimentación basada en vegetales, pero también del aprovechamiento de lo producido, para el que existe un amplio margen de mejora.

PÁGINAS ANTERIORES: FCAFOTODIGITAL/GETTY IMAGES

Comida desperdiciada en el mundo

De la granja a la mesa, un preocupante 40 por ciento de los alimentos producidos se pierde a lo largo de la cadena de abastecimiento. Un cambio básico dirigido a reducir el consumo excesivo y a la adopción de una alimentación mayoritariamente vegetal, aunado con la aplicación de técnicas de aprovechamiento en cada etapa, lograría recortar drásticamente las pérdidas. Esas medidas permitirían proveer de alimentos a millones de personas que pasan hambre, paliarían enormemente los problemas de escasez de agua y reducirían el gasto energético y las emisiones de carbono.



PRÁCTICA ACTUAL

Este escenario de referencia supone que la población mundial y el consumo per cápita seguirán aumentando al mismo ritmo que en las últimas décadas; el 40 por ciento de los alimentos producidos se desperdicia.

APROVECHAMIENTO FACTIBLE

Si media humanidad consumiese 2300 kilocalorías al día y comiese más alimentos de origen vegetal y menos carne, y al mismo tiempo se mitigaran las pérdidas a lo largo de la cadena de suministro, el desperdicio se reduciría al 20 por ciento en 2050.

APROVECHAMIENTO AMBICIOSO

Si tres cuartas partes de la humanidad adoptasen las medidas descritas en el escenario «ambicioso», el derroche podría caer hasta el 10 por ciento.

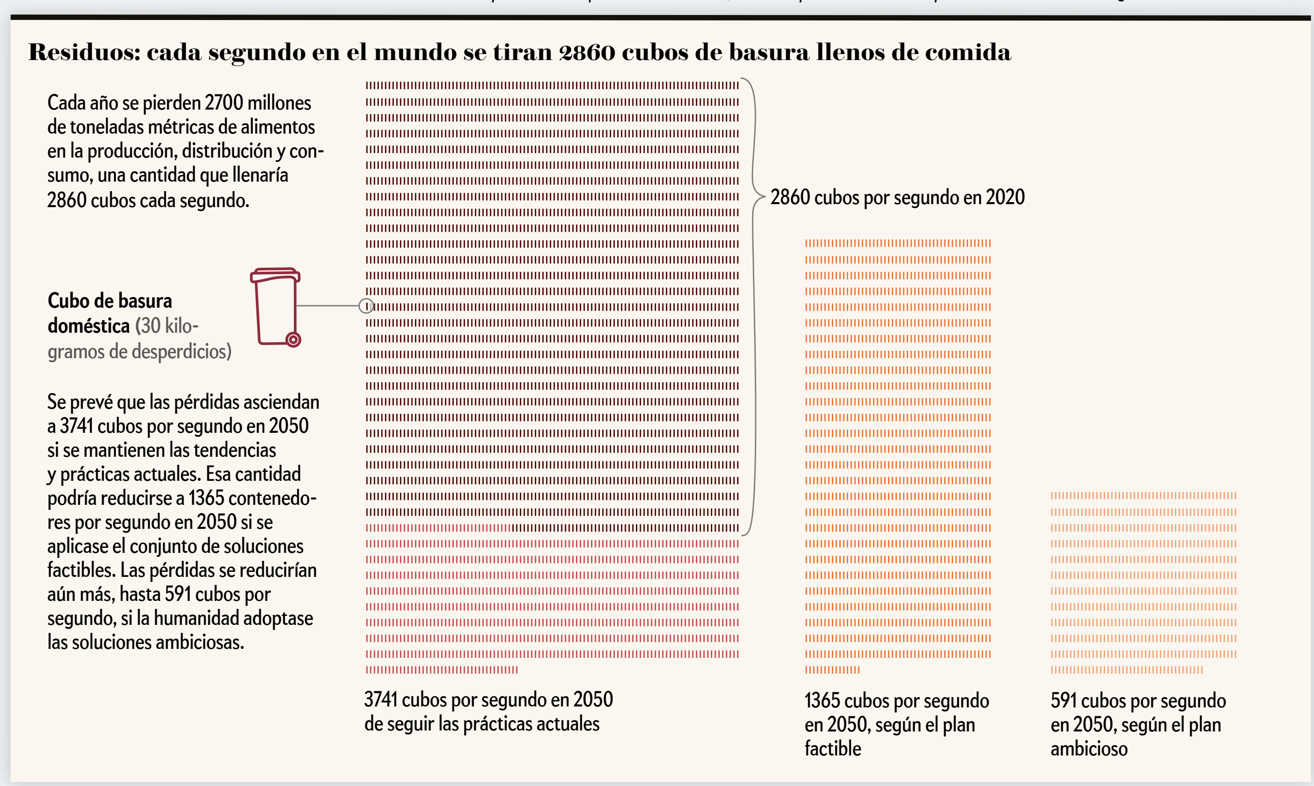
** Las previsiones empiezan en el año 2018, de modo que los valores correspondientes a 2020 difieren ligeramente en cada escenario.*

Residuos: cada segundo en el mundo se tiran 2860 cubos de basura llenos de comida

Cada año se pierden 2700 millones de toneladas métricas de alimentos en la producción, distribución y consumo, una cantidad que llenaría 2860 cubos cada segundo.

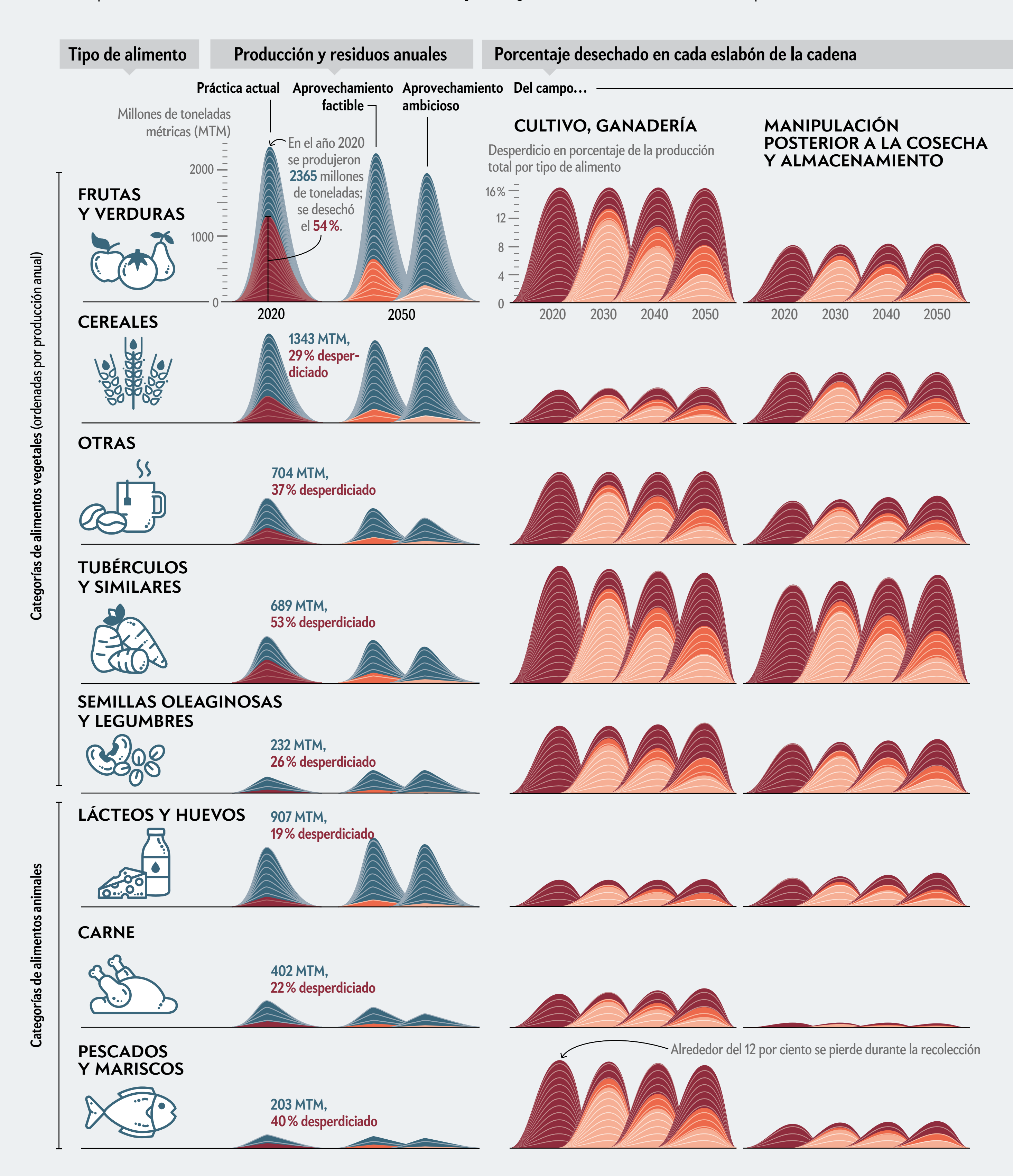
Cubo de basura doméstica (30 kilogramos de desperdicios)

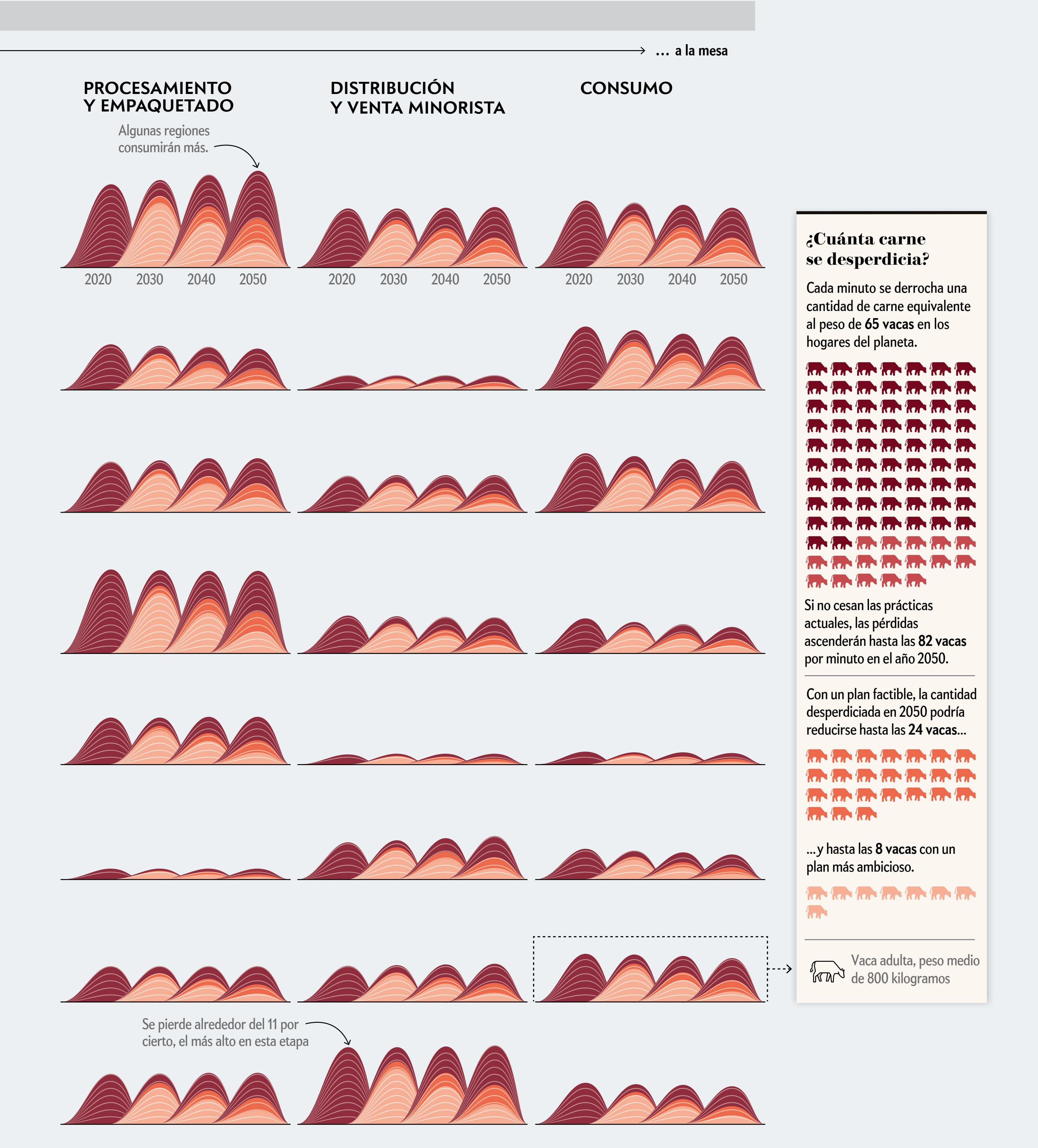
Se prevé que las pérdidas asciendan a 3741 cubos por segundo en 2050 si se mantienen las tendencias y prácticas actuales. Esa cantidad podría reducirse a 1365 contenedores por segundo en 2050 si se aplicase el conjunto de soluciones factibles. Las pérdidas se reducirían aún más, hasta 591 cubos por segundo, si la humanidad adoptase las soluciones ambiciosas.



Pérdidas y posibles reducciones en la cadena de abastecimiento

En todos los eslabones que median entre el campo y la mesa se pierden alimentos destinados al consumo humano, tanto vegetales como animales. Las cifras aquí indicadas representan los valores globales promedio, pero en los países de renta baja el desperdicio se concentra sobre todo en las primeras etapas, durante el cultivo, la crianza y el almacenamiento. En los países de renta alta se genera más derroche en las etapas finales, sobre todo en los mercados, los restaurantes y los hogares. En definitiva, las soluciones dependerán de la ubicación.





¿Cuánta carne se desperdicia?

Cada minuto se derrocha una cantidad de carne equivalente al peso de **65 vacas** en los hogares del planeta.

Si no cesan las prácticas actuales, las pérdidas ascenderán hasta las **82 vacas** por minuto en el año 2050.

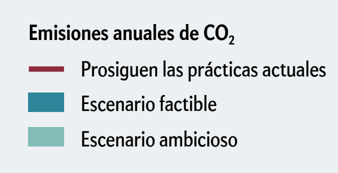
Con un plan factible, la cantidad desperdiciada en 2050 podría reducirse hasta las **24 vacas**...

...y hasta las **8 vacas** con un plan más ambicioso.

Vaca adulta, peso medio de 800 kilogramos

Emisiones de carbono evitadas

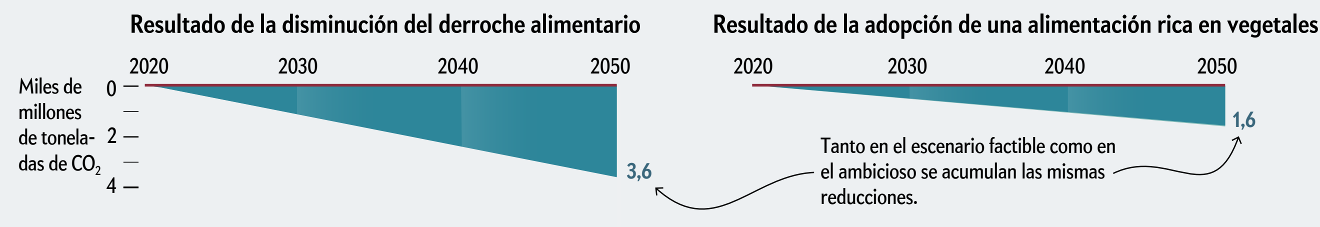
Si la población mundial, el consumo per cápita y el desperdicio alimentario a lo largo de la cadena de abastecimiento siguen las tendencias recientes, se emitirán enormes cantidades de gases de efecto invernadero en relación con los alimentos. Asimismo, habrá que destinar más terrenos a cultivos, lo cual generará emisiones adicionales y reducirá la extensión de los bosques y las praderas capaces de absorber el dióxido de carbono atmosférico. Los cambios sugeridos en los escenarios factible y ambicioso contribuirían a reducir en gran medida las emisiones.



REDUCCIONES DE LAS EMISIONES...

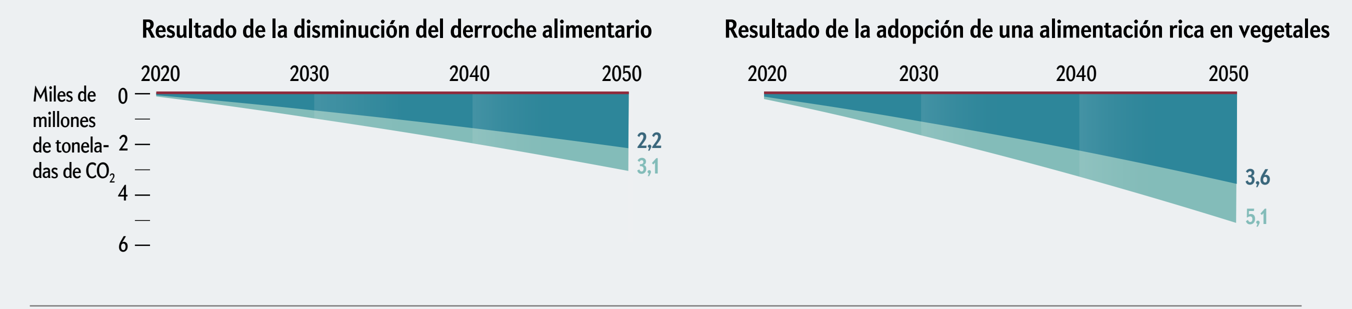
... EVITANDO LA RECONVERSIÓN DEL SUELO

En contraste con lo que ocurriría si las prácticas actuales se mantuviesen hasta 2050, la reducción de los desperdicios alimentarios y la adopción de una alimentación rica en vegetales, conforme a los planteamientos de los escenarios factible y ambicioso, permitirían producir alimentos suficientes en las tierras de cultivo actuales para todo el mundo. El freno a la desforestación que esto supondría evitaría la emisión de miles de millones de toneladas de dióxido de carbono.

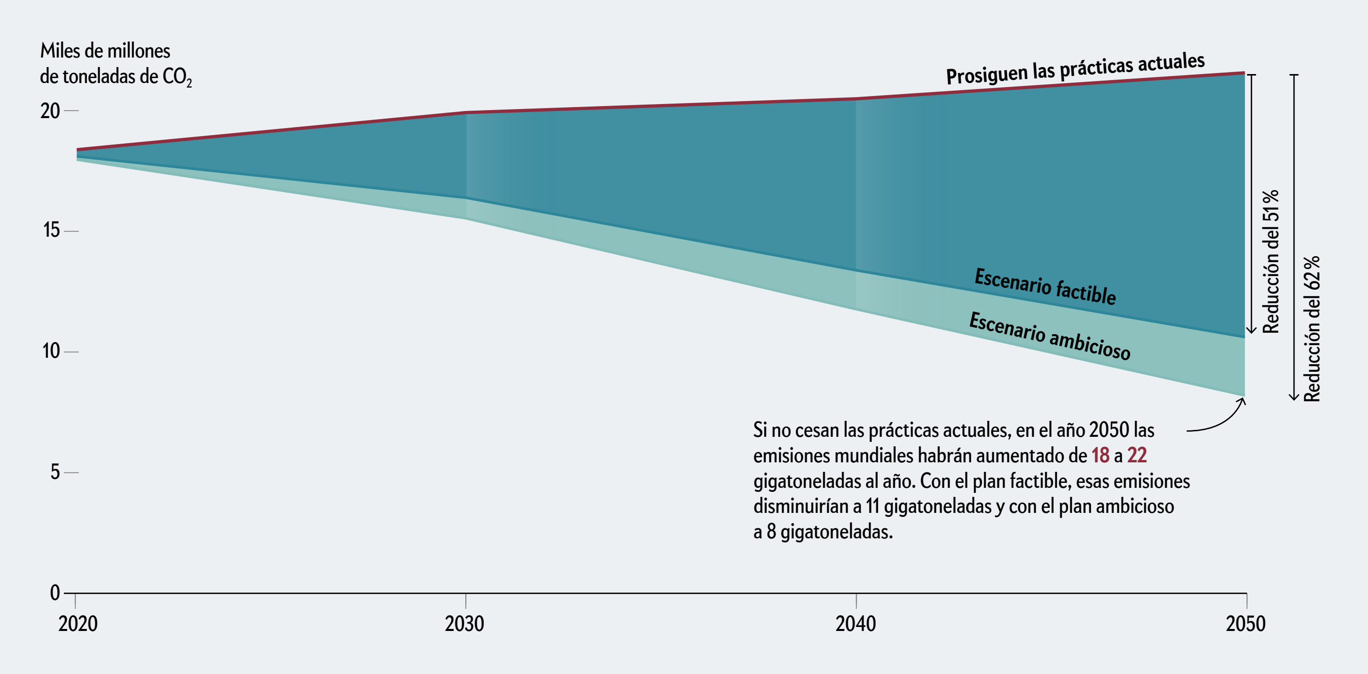


... MEJORANDO LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Una producción más eficiente basada en técnicas de agricultura regenerativa en los escenarios factible y ambicioso reduciría aún más las emisiones gracias al descenso del derroche alimentario y a la transición hacia una alimentación rica en vegetales.



REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES TOTALES DE CO_2 MOTIVADA POR LOS CAMBIOS ANTERIORES (ANUAL)



Viene de la página 32
el apetito, sobre todo en las regiones ricas. En los países de renta alta, los restaurantes y los hogares encienden hornos y cocinas que consumen energía, mientras que en los países en vías de desarrollo millones de personas queman biomasa en nocivos fogones que escupen hollín, humos malsanos y sustancias contaminantes.

Después de todas esas actividades que generan residuos, una parte excesiva de la comida que llega a la mesa acaba tirada a la basura, que suele ser transportada en camiones propulsados por combustibles fósiles hasta los vertederos, donde a consecuencia de la descomposición se libera metano, otro potente gas de efecto invernadero. Tirar las sobras de una lasaña genera muchas más emisiones que un tomate podrido que nunca abandona el huerto. Hemos de mejorar nuestro modo de actuar.

REDUCIR LA HUELLA ALIMENTARIA

En el Proyecto Drawdown volcamos datos mundiales procedentes de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), entre otras muchas fuentes, en un minucioso modelo del sistema de producción y consumo de los alimentos. El modelo tiene en cuenta las previsiones demográficas, así como el aumento de la ingesta de carne y del consumo per cápita, especialmente en los países en vías de desarrollo, tomando como referencia las tendencias reales de las últimas décadas. Según nuestros cálculos, la alimentación sana y las técnicas agrícolas regenerativas traen consigo una menor «huella alimentaria»: menos residuos, menos emisiones y un medio ambiente más limpio.

Si la mitad de la humanidad ingiriese unas saludables 2300 kilocalorías al día a base de una alimentación rica en vegetales y pusiera en práctica las acciones que ya han demostrado ser eficaces en la reducción del desperdicio a lo largo de la cadena de abastecimiento, la pérdida de alimentos, que en la actualidad supone el 40 por ciento de la producción, se rebajaría a la mitad, lo que supondría aprovechar una cantidad fabulosa de comida. Y si nos decidiéramos a ser más ambiciosos, siguiendo esas mismas prácticas el porcentaje desechado podría descender hasta el 10 por ciento [*véanse más detalles en los gráficos de las páginas 33-36*].

Este jugoso aprovechamiento sería posible en parte con cambios en los hábitos básicos de alimentación. Para empezar, si en el mundo desarrollado se incentivase la ingesta media de 2300 kilocalorías diarias en lugar de las 3000 o más que a menudo se engullen, disminuiría el derroche de comida. En los países en vías de desarrollo se suele incrementar la ingesta de calorías y proteínas con objeto de alcanzar los niveles nutricionales requeridos, lo cual acarrea cierto aumento de lo que el sistema descarta. No obstante, en general si todos los habitantes del planeta adoptasen prácticas de consumo sensatas y una alimentación en la que predominasen los vegetales, no necesariamente vegetariana, en la próxima treintena de años se evitaría el desperdicio de 166 millones de toneladas métricas de alimentos. Transmitido a toda la cadena de abastecimiento, el resultado se traduciría en un aumento de la producción agraria y en la disminución de la ganadera.

La reducción del desperdicio a través del ajuste de la producción y del consumo beneficiaría también al medio ambiente. Los diversos alimentos (cereales, hortalizas, pescado, carne, lácteos, etc.) poseen una huella medioambiental distinta. Por término medio, el cultivo y la recolección de un kilo de tomates genera unos 0,35 kilogramos de dióxido de carbono; producir la misma cantidad de carne de vacuno genera una media de 36 kilos de ese gas. Si se tiene en cuenta la cadena de suministro en su totalidad, las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por los productos vegetales son entre 10 y 50 veces menores que las emitidas con la mayoría de los productos de origen animal.

Además, la agricultura industrial ha extendido el monocultivo, la labranza excesiva y el uso generalizado de fertilizantes y pesticidas sintéticos. Estas son prácticas que degradan el suelo y lanzan a la atmósfera grandes volúmenes de gases de efecto invernadero. Las plagas y las enfermedades siguen asolando los cultivos y los alimentos básicos se pueden pudrir durante el almacenamiento. A ello hay que sumar las emisiones derivadas del consumo de pastos y piensos por el ganado.

Las técnicas agroecológicas orientadas al control de las plagas, como la plantación conjunta de cultivos distintos y la rotación inteligente pueden erradicar las plagas y las malas hierbas, con la consecuente mitigación de las pérdidas. Los sistemas mejorados de gestión ganadera, como el silvopastoreo, basado en la integración de estratos arbóreos en los terrenos destinados a pasto, aumentan la calidad y la cantidad de los productos animales: más alimento con menos cabezas de ganado en el campo y, por lo tanto, menos recursos gastados y menos pérdidas. Y puesto que las técnicas agrícolas regenerativas —que favorecen mejoras del rendimiento del 5 al 35 por ciento, la recuperación del suelo y la absorción del carbono atmosférico— emplean compost y estiércol en lugar de fertilizantes artificiales, todo alimento no apto para abandonar el campo es susceptible de ser reciclado y reutilizado como abono natural o de ser convertido en biogás en digestores anaerobios para generar energía *in situ*. Es preciso incentivar aún más esas prácticas. Con ese objetivo, restaurantes repartidos por todo Estados Unidos colaboran a través de una interesante organización llamada Zero Foodprint («huella alimentaria cero»), creada por el chef Anthony Myint, que destina unos centavos de las facturas de los comensales a financiar granjas regenerativas en desarrollo.

Tirar las sobras de una lasaña genera muchas más emisiones de gases de efecto invernadero que un tomate podrido que nunca abandona el huerto. Hemos de mejorar nuestro modo de actuar

SALVAR LA TERCERA BOLSA

En los países de renta baja, una buena parte de los alimentos se desecha antes de llegar al mercado. Mejorar la educación y la formación de los agricultores y los ganaderos de esas regiones, junto con la aplicación de tecnologías innovadoras, minimizaría las pérdidas. Por ejemplo, el estado indio de Jharkhand ha instalado cámaras de refrigeración alimentadas por energía fotovoltaica con el fin de que los agricultores almacenen las

verduras, frutas y demás alimentos perecederos que cosechan sin que se resienta la calidad; el proyecto está dirigido por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial. En África, el Consorcio de Centros Internacionales de Investigación Agrícola ha ampliado la formación orientada a mejorar la productividad de los pequeños agricultores bajo las nuevas condiciones que impone el cambio climático, a través de cultivos tolerantes a la sequía y técnicas agrícolas sin labranza que protegen los suelos agostados.

En los países de rentas medias y altas, la mayor parte del desperdicio alimentario se concentra en los últimos eslabones de la cadena, en los mercados y los hogares, donde los consumidores gozan de un tremendo poder para combatir el despilfarro. Un primer paso consiste en reflexionar sobre qué y cuánto compramos. Y ello empieza con la decisión consciente de comprar solo lo que vayamos a comer, y de comer solo lo que compremos. Evitar el despilfarro pasa por no hacer un acopio excesivo de productos perecederos y de otro tipo, sino comprar la cantidad justa. Si para la cena se cocina demasiado, guardar debidamente las sobras reduce su deterioro; o como alternativa se puede compartir con los vecinos y, de paso, estrechar así los lazos de vecindad.

Se requieren, además, cambios culturales de mayor calado. La campaña «Frutas y verduras sin gloria», lanzada por la cadena de supermercados francesa Intermarché en 2014, aspiraba a recortar el desperdicio cambiando la actitud cultural hacia los alimentos «imperfectos». Los mercados tienden a adquirir frutas y verduras que se ajustan a una percepción cultural idealizada de su forma y color. Los productos que no satisfacen plenamente esas características engañosas representan hasta el 40 por ciento de las frutas y verduras comestibles que se descartan antes de salir de los huertos. Sin embargo, Intermarché vende esas frutas y verduras en pasillos especiales e impulsa una campaña nacional de promoción en la que se ensalza todo aquello que no suele ensalzarse. Otros minoristas llegan incluso más lejos. Todas las estanterías del supermercado danés WeFood están repletas de productos que en otras circunstancias habrían acabado en el vertedero. La organización 412 Food Rescue, con sede en Pittsburgh, EE.UU., distribuye gratuitamente a personas necesitadas alimentos nutritivos que estaban condenados a acabar en el vertedero por sus imperfecciones, al no ser del todo frescos (como el pan del día anterior) o por culpa de un etiquetado poco claro.

Los mayoristas, los minoristas y los restaurantes desempeñan una función importante a la hora de rebajar los montones de comida dilapidada. Pueden exigir que sus proveedores adquieran los alimentos procedentes de explotaciones regenerativas locales. Garantizar que los productos se vendan con etiquetas claras y unificadas en cuanto a la «fecha de caducidad» ayuda a los encargados de las tiendas a saber en qué momento deben rebajar un artículo, y al consumidor cuándo debe desecharlo. Los propietarios de los restaurantes pueden ofrecer raciones de distintos tamaños y menos platos en el menú, así como animar a la clientela a llevarse las sobras a casa.

Los gobiernos y las empresas que ofrecen servicios de alimentación a sus empleados también deben participar. Las cafeterías de los edificios del gobierno federal de Estados Unidos prestan servicio a más de dos millones de personas; imaginemos que los responsables de las cocinas decidiesen ofrecer platos ricos en vegetales, elaborados con productos imperfectos y procedentes de proveedores regenerativos. En la actualidad, Google ya ha empezado a implantar esas medidas en sus cafeterías.



Por muy concienciados que estemos, será inevitable que una fracción de los alimentos se pierda a lo largo de la cadena de abastecimiento. Los digestores anaeróbicos y el compostaje son mejores alternativas que la acumulación de desechos en los vertederos, pues nutren el suelo o generan electricidad. Ocho estados de EE.UU. disponen ya de leyes que exigen que los residuos orgánicos no se depositen en los vertederos para evitar las fuertes emisiones de metano. El último análisis del Proyecto Drawdown muestra que la aplicación de estas soluciones a escala mundial reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero en unos 14.000 millones de toneladas métricas en los próximos treinta años.

La verdadera magia surge cuando se adoptan varias soluciones en paralelo y se prolongan en el tiempo. Las decisiones que tomen agricultores, directivos, comerciantes, cocineros y consumidores pueden evitar la pérdida de suficientes alimentos como para sostener a la humanidad hasta 2050 sin necesidad de dedicar más tierras a las actividades agropecuarias, de modo que sería posible erradicar el hambre y mantener una población más sana. Y la extensión cultivada seguiría bastando para obtener materiales orgánicos como bioplásticos, aislantes y biocombustibles.

La renovación de la cadena alimentaria y el cambio en los hábitos de consumo no sucederán de la noche a la mañana. Tampoco será cosa de un día el que nos convirtamos en perfectos conocedores de las plantas y nos imbuyamos de una mentalidad regenerativa y de una exigencia rayana en la manía en cuanto a lo que adquirimos y lo que desechamos. Nuestra labor básica como consumidores consiste en ser conscientes de las decisiones que tomamos y en procurar ser «solucionistas» en la medida de lo posible. Juntos salvaremos esa tercera bolsa de la compra. IyC

PARA SABER MÁS

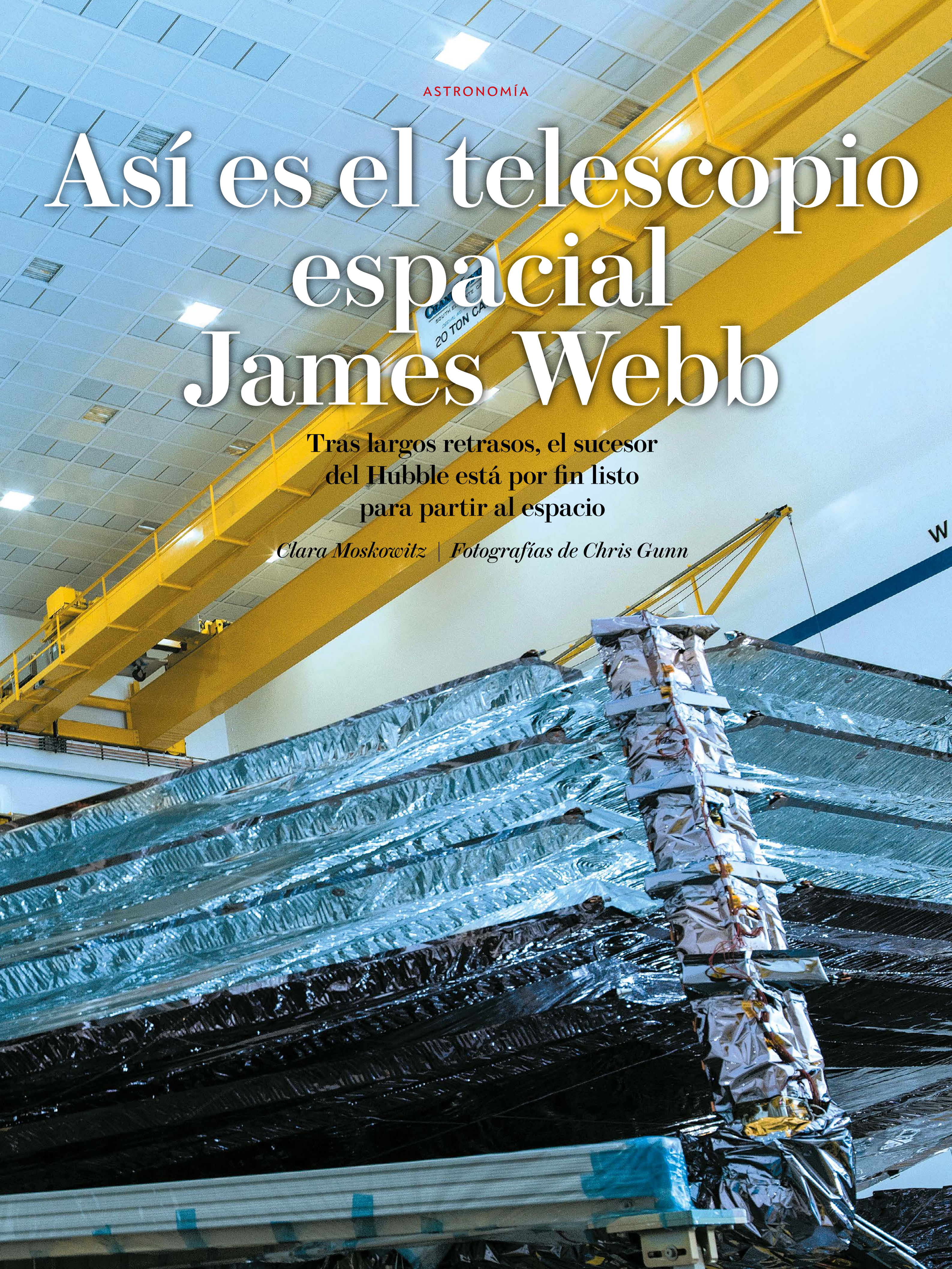
Projecto Drawdown. Tabla de soluciones. https://www.drawdown.org/solutions/table-of-solutions
Evidence of impact: Climate-smart agriculture in Africa. Mary Nyasimi et al. Working paper n.º 86, CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security, 2014.
Solar-powered micro cold storage plant demonstrated in Jharkhand. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo-India en *Sameeksha Newsletter*, vol. 10, págs. 6-7, marzo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Alimentación sostenible. Jonathan A. Foley en *IyC*, enero de 2012.
Transformar el sistema alimentario global. Günther Fischer en *IyC*, marzo de 2019.
La encrucijada de la biomasa. Eric Toensmeier y Dennis Garrity en *IyC*, octubre de 2020.



MONTADO Y LISTO
El telescopio espacial James Webb ya está totalmente construido y su lanzamiento está previsto para este mes de diciembre. Hasta entonces, aguarda en unas instalaciones que su contratista principal, Northrop Grumman, posee en Redondo Beach, California.



Así es el telescopio espacial James Webb

Tras largos retrasos, el sucesor del Hubble está por fin listo para partir al espacio

Clara Moskowitz | *Fotografías de Chris Gunn*

Clara Moskowitz es redactora de *Scientific American* especializada en física y ciencias del espacio.

Chris Gunn es fotógrafo especializado en ciencia y tecnología. Es el fotógrafo principal de la NASA para el proyecto del telescopio espacial James Webb.



Como fotógrafo de la NASA, Chris Gunn ha documentado la construcción del telescopio espacial James Webb desde los primeros días del instrumento. Desde 2009, ha captado todos los hitos y ha presenciado cómo se ensamblaban y ponían a prueba casi todas sus piezas. Está previsto que el telescopio llegue al espacio en diciembre, y que en los meses siguientes despliegue el espejo de 6,5 metros de diámetro con el que escudriñará el firmamento. En ese momento, el objeto de las instantáneas de Gunn se convertirá a su vez en fotógrafo. «Lo más importante para mí es ver esas imágenes iniciales, la primera luz», afirma Gunn.



El James Webb, un proyecto conjunto de la NASA, la Agencia Espacial Europea y la Agencia Espacial Canadiense, observará algunas de las galaxias más antiguas del universo, obtendrá imágenes de nuevos planetas e incipientes sistemas solares en torno a otras estrellas e incluso explorará con más detalle los mundos de nuestro propio Sol. Con un coste de 10.000 millones de dólares, será el telescopio más caro y ambicioso jamás construido. Está optimizado para detectar la luz infrarroja, la más adecuada para estudiar los objetos del universo temprano y remoto. «Hace tiempo que esperamos un observatorio así», señala Knicole Colón, subdirectora científica del proyecto de exoplanetas del telescopio. «La mirada del James Webb se extenderá hasta las primeras galaxias, tan atrás en el tiempo como es posible, y su sensibilidad nos permitirá otear las atmósferas de los exoplanetas a profundidades que nunca hemos contemplado.»

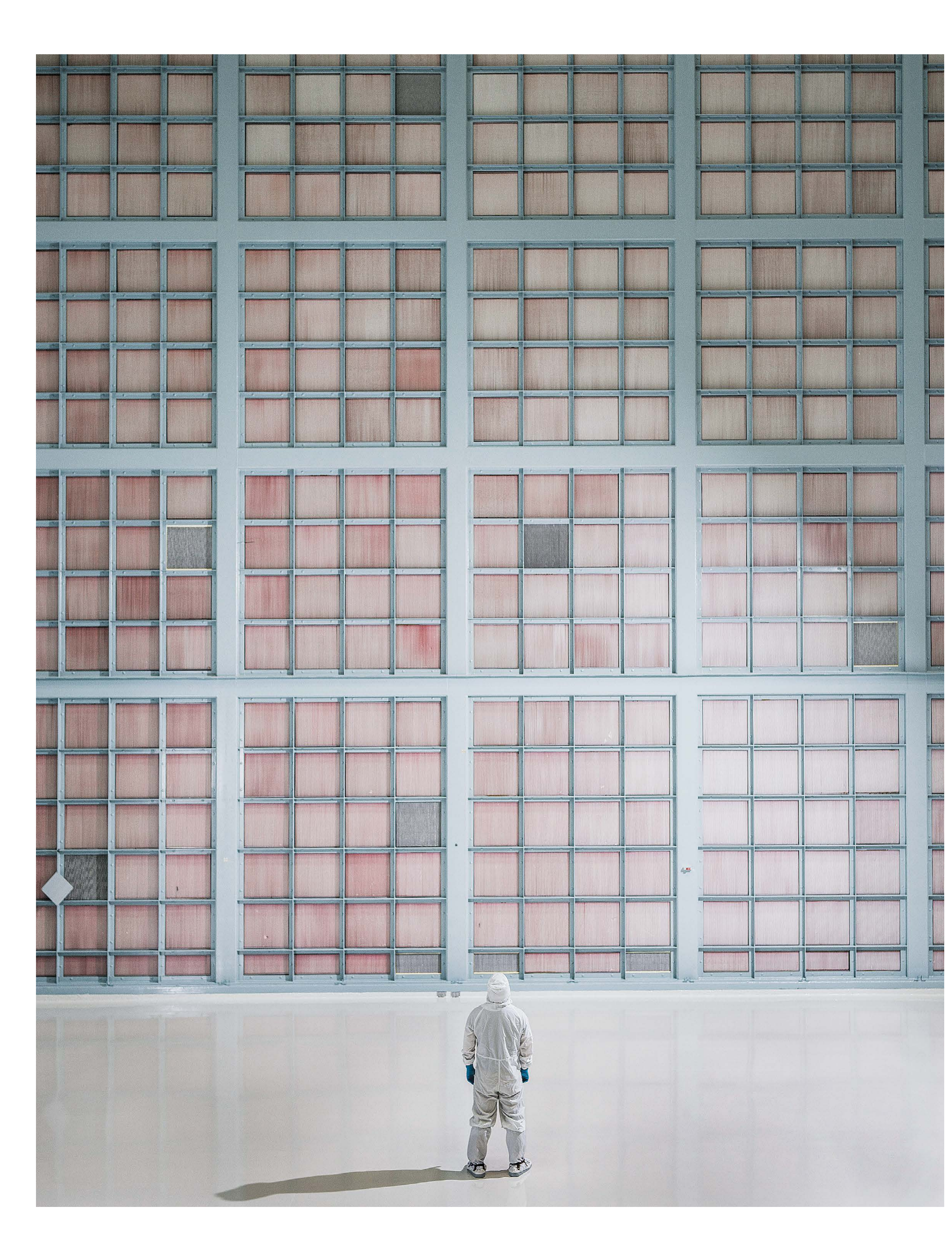
Para evitar la contaminación térmica procedente del Sol y la Tierra, el James Webb volará hasta un punto de observación situado a 1,5 millones de kilómetros de nuestro planeta, donde desplegará un escudo solar del tamaño de una pista de tenis para obtener protección adicional. Esta delicada maniobra, así como la apertura de los espejos primario y secundario, deberá transcurrir sin incidentes, ya que enviar astronautas para reparar el telescopio —como en su día ocurrió con el Hubble— no es una opción. «Tengo plena confianza en que nuestros ingenieros han hecho un gran trabajo y han puesto a prueba todo lo que se podía probar», asegura Heidi Hammel, científica interdisciplinaria del James Webb. «En algún momento hay que dar el paso. Estamos preparados.»

El camino del observatorio hasta su lanzamiento ha sido accidentado. En principio, estaba previsto que costara como mucho 1000 millones de dólares y despegara en torno a 2007. Sin embargo, por el camino se produjeron multitud de problemas de gestión, retos técnicos, sobrecostes y retrasos. Cuando el instrumento por fin se eleve a lomos de un cohete Ariane 5 desde la Guayana Francesa, los miles de científicos, ingenieros y demás personas que han trabajado en él esperarán un viaje tranquilo. «Esto representa una parte realmente enorme de mi vida», valora Gunn. «Es casi como criar a un hijo, aunque obviamente es un poco distinto, al haber tantos otros padres.» IyC



LLEGAN LOS ESPEJOS

Los técnicos inspeccionan uno de los 18 segmentos hexagonales que compondrán el espejo primario del James Webb. Estas piezas de berilio, cada una recubierta con 3,4 gramos de oro, se diseñaron para ser muy resistentes y a la vez ligeras: cada una pesa apenas 20 kilos. Están montadas en una estructura que viajará plegada en el interior del cohete durante el despegue y luego se abrirá en el espacio. «Este momento fue memorable porque la mayoría de la gente que aparece en la fotografía aún no había visto los espejos en persona», recuerda Gunn. «Al principio los espejos llegaban de uno en uno, luego en grupos de dos y tres. Cada inspección duró una hora u hora y media.»



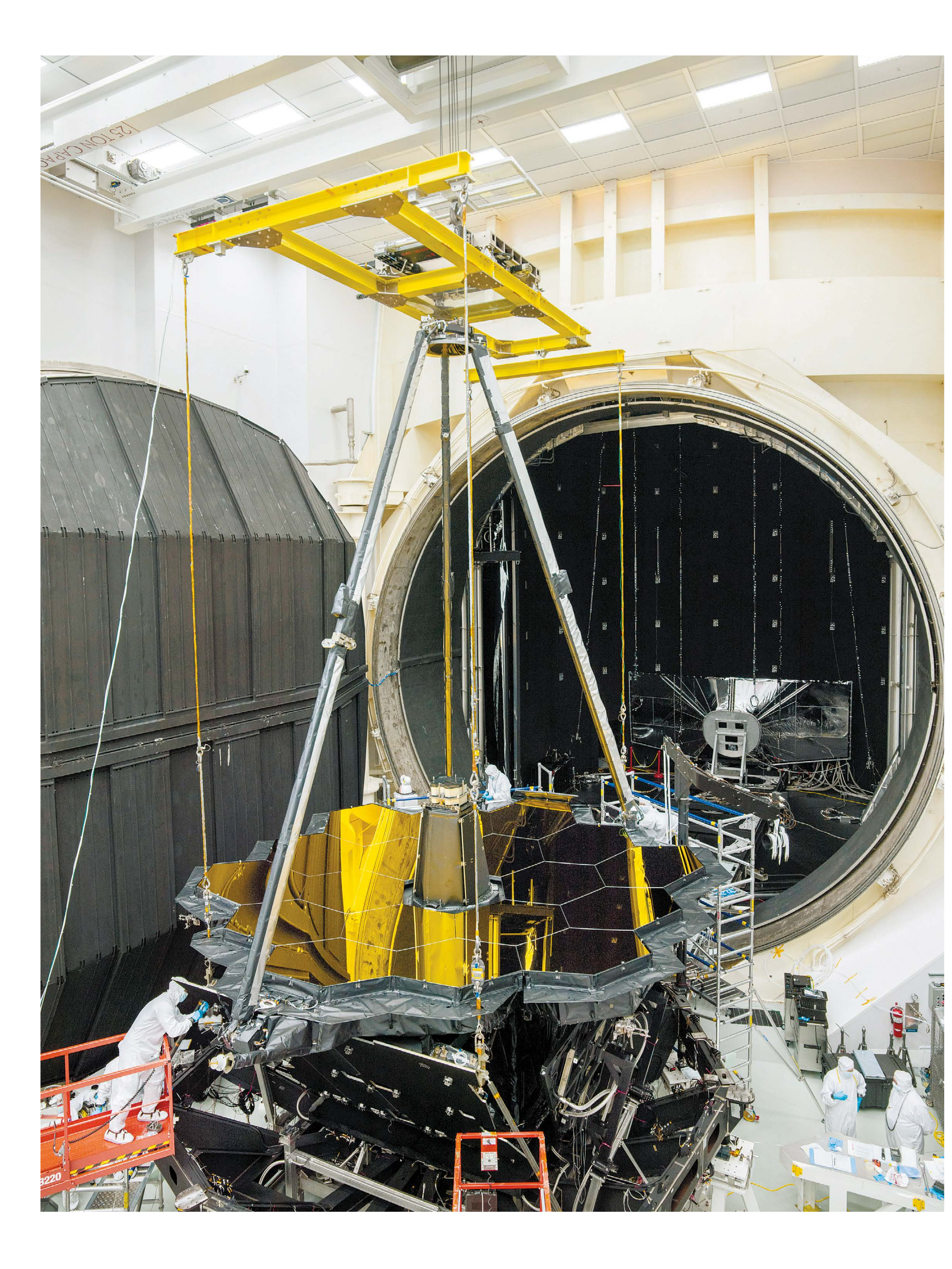


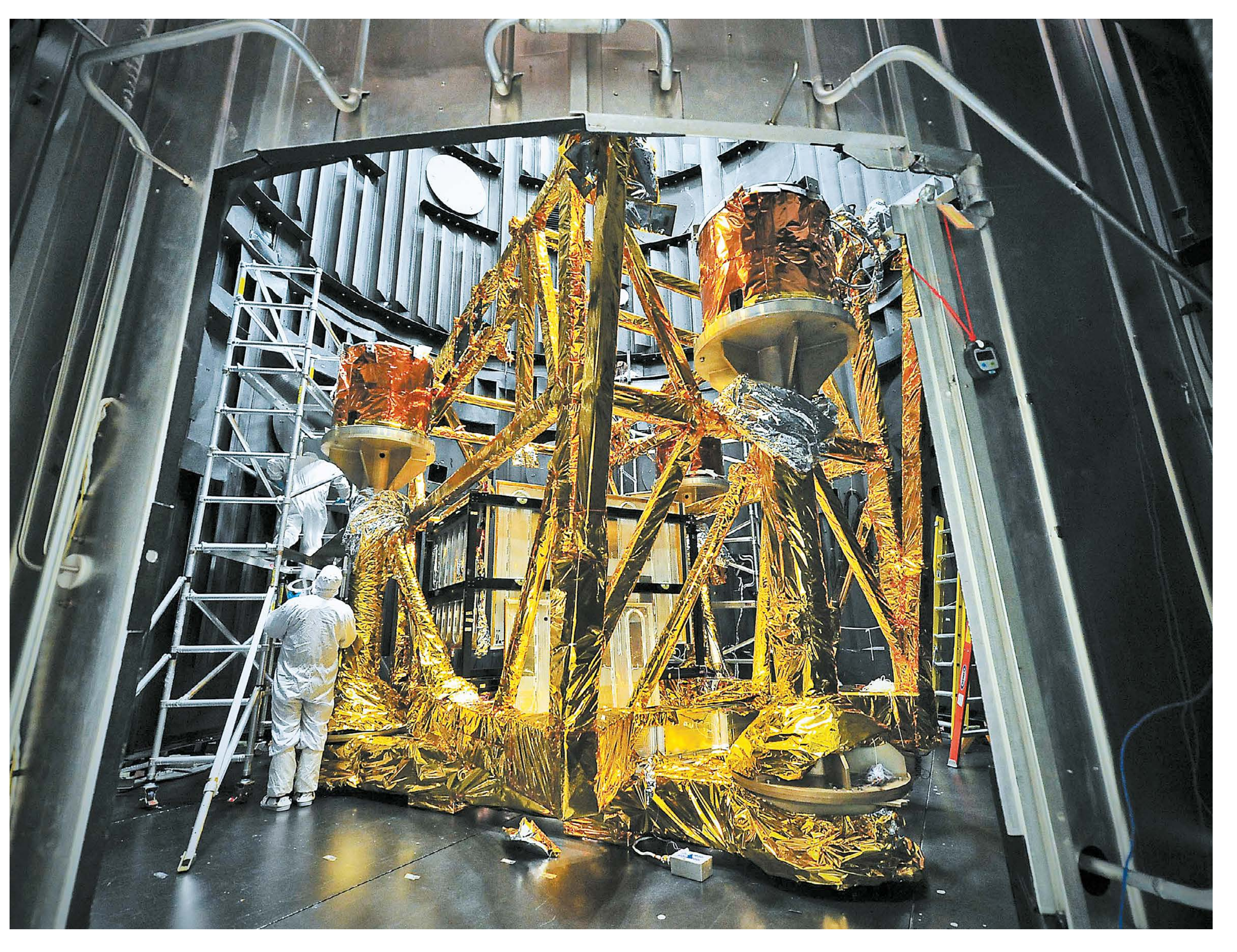
CARGA FRÁGIL

Los operarios transportan uno de los segmentos del espejo del observatorio, que llegaron al Centro Goddard en contenedores especialmente construidos por su fabricante, la compañía Ball Aerospace. Cada uno de los segmentos mide 1,32 metros de ancho y en conjunto ofrecen un área de observación seis veces mayor que el espejo del telescopio espacial Hubble.

SALA ULTRALIMPIA

Antes de juntar las distintas piezas del James Webb, sus espejos e instrumentos se ensamblaron cuidadosamente en la Sala Blanca de Gran Altura del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA. Esta sala de unos 37.000 metros cúbicos y una de las más grandes del mundo de este tipo, posee una pared entera de filtros de aire de alta eficacia (HEPA) para proteger los delicados sistemas ópticos del telescopio de la suciedad y el polvo.



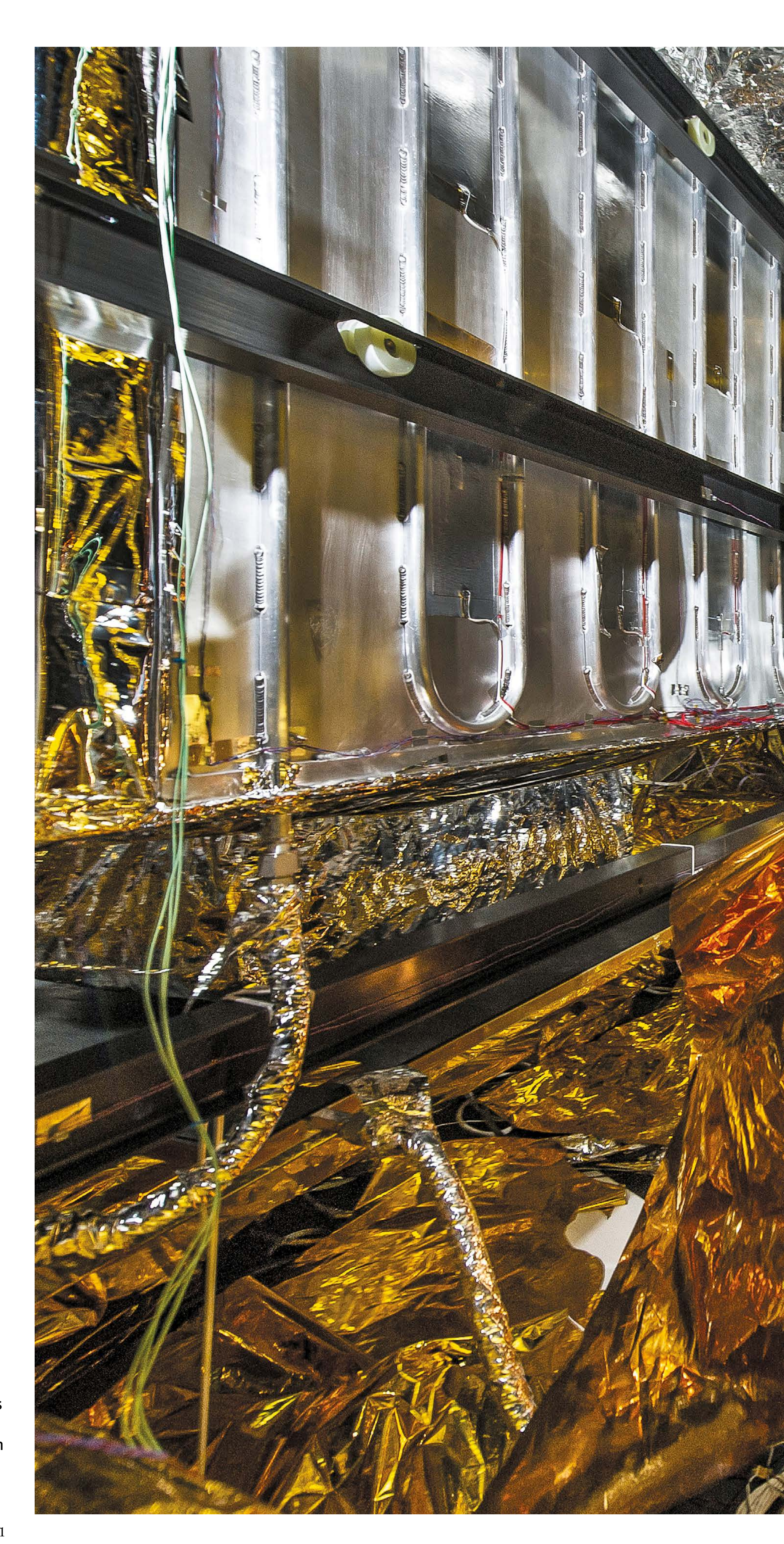


JAULA DORADA

Antes de construir y probar los componentes reales, se expuso una imitación de los sistemas ópticos del James Webb, el llamado Simulador de Elementos Ópticos del Telescopio, a condiciones similares a las del espacio. El ensayo se realizó en el Simulador del Entorno Espacial del Centro Goddard, donde unas mantas térmicas de oro envuelven un sistema de soportes y de dispositivos para controlar la temperatura. Entre ellos hay un conjunto de paneles de nitrógeno líquido que ayudan a mantener el simulador a unos 100 kelvin, a fin de recrear las temperaturas extremas que experimentará el telescopio más allá de la Tierra.

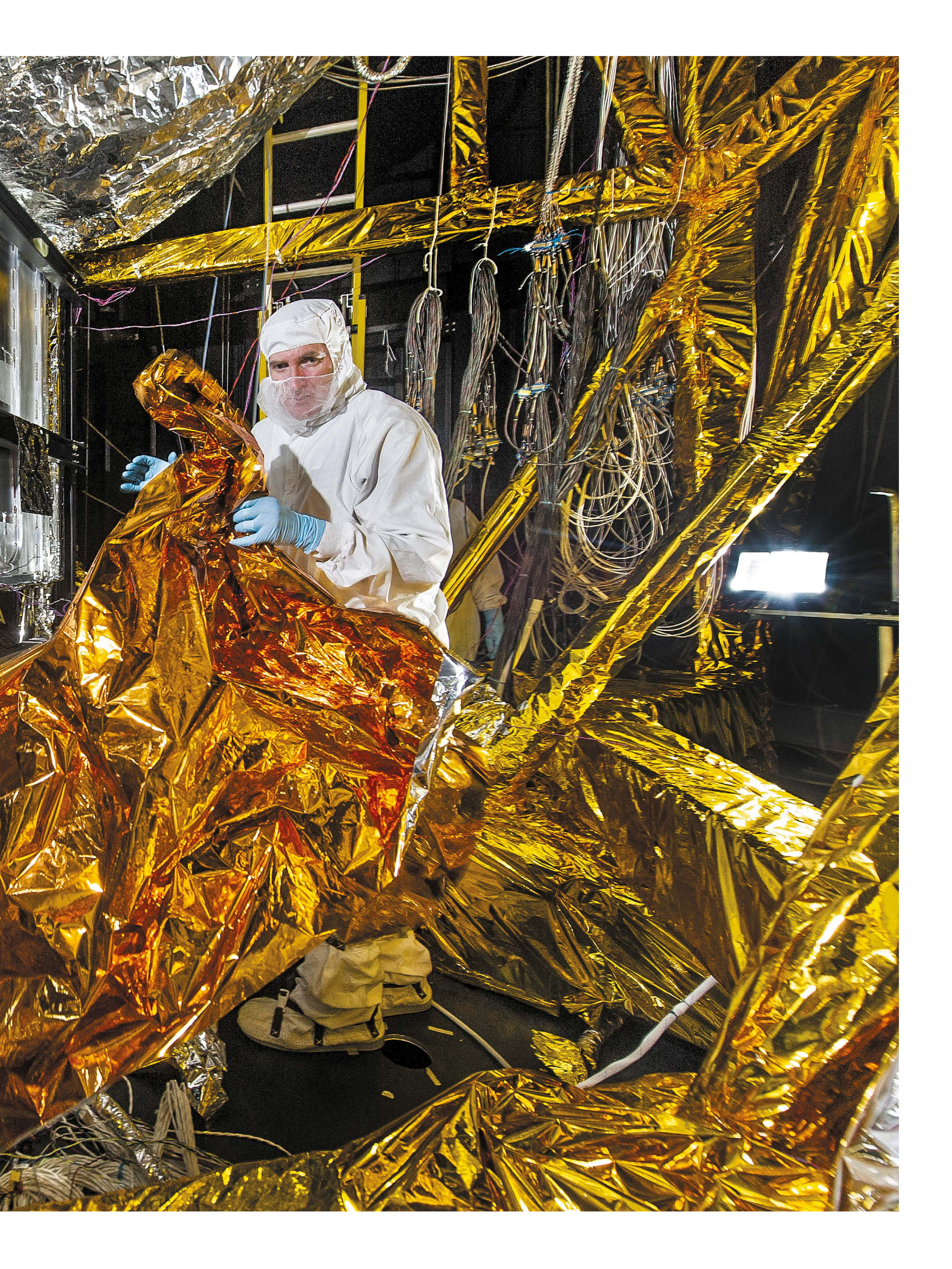
FRÍA Y SIN AIRE

Para garantizar que el James Webb soporta las gélidas condiciones de vacío del espacio, sus instrumentos y sistemas ópticos fueron sometidos a 100 días de pruebas criogénicas en la cámara A, una enorme sala de vacío térmico del Centro Espacial Johnson de la NASA, en Houston. Una puerta circular de 40 toneladas y 12,2 metros de diámetro da acceso a la mayor cámara criogénica y de alto vacío para pruebas ópticas del mundo, que en los años sesenta sirvió para evaluar los componentes de las misiones Apolo a la Luna.



PRUEBAS REPETIDAS

Un técnico maneja con cuidado la lámina de oro que envuelve los instrumentos durante las pruebas criogénicas realizadas en el Simulador del Entorno Espacial. Estos análisis intensivos y repetidos buscan garantizar el funcionamiento del James Webb cuando llegue a su destino. Una vez allí, los científicos no tendrán manera de intervenir si algo va mal, más allá de corregir problemas de *software*. «Sin duda es un observatorio muy complejo que, al contrario que el Hubble, no podremos reparar», explica Colón. «Pero el James Webb tiene muchos elementos redundantes en sus sistemas mecánicos y se ha comprobado cada pequeño detalle con gran meticulosidad.»







AISLAMIENTO ADICIONAL

El complejo escudo solar del James Webb no es el único elemento que ayudará a mantener frío el telescopio. Un revestimiento protector tras el espejo primario impedirá que los sensores infrarrojos reciban luz y calor no deseados. Dado que se trata de un observatorio abierto (sin la carcasa cilíndrica que circunda los sistemas ópticos en la mayoría de los telescopios), esta capa adicional ayudará a eliminar incluso la tenue contaminación lumínica de las estrellas y galaxias.

LUCES FUERA

Los técnicos examinan los espejos de James Webb durante un ensayo sin luz. «Es una toma nocturna, porque tuvieron que hacer esta prueba a oscuras», señala Gunn. «Siempre he querido que mis imágenes reflejen la cantidad de trabajo que conlleva el proyecto. La gente habla del James Webb y del tiempo que ha llevado construirlo, pero creo que si comprendieran todo el esfuerzo que se ha realizado, el tiempo no les parecería tan importante.»

PARA SABER MÁS

The James Webb Space Telescope. Jonathan P. Gardner et al. en *Space Science Reviews*, vol. 123, págs. 485-606, noviembre de 2006.

EN NUESTRO ARCHIVO

El próximo observatorio espacial. Robert Irion en *IyC*, diciembre de 2010.
Veinticinco años del Hubble. Axel M. Quetz y Uwe Reichert en *IyC*, abril de 2015.
El mayor ojo del planeta. Xavier Barcons, Juan Carlos González Herrera y Agustín Sánchez Lavega en *IyC*, octubre de 2019.

por Leslie Nemo

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Semillas y frutos extraños de todo el planeta

La fotografía científica revela estrategias sorprendentes de la reproducción vegetal

Cuando admiramos una planta sucede con frecuencia que las flores acaparan toda nuestra atención. Nadie pone en duda que los efímeros brotes florales puedan ser deslumbrantes. Pero lo que aparece una vez que los pétalos se marchitan y caen —los frutos y las semillas— es bello por derecho propio.

En su nuevo libro *The hidden beauty of seeds & fruits: The botanical photography of Levon Biss* [«La belleza oculta de las semillas y los frutos: La fotografía botánica de Levon Biss»], el autor retrata algunos de los ejemplos más sorprendentes e insólitos de los elementos vegetales más funcionales, que emergen una vez que la mayoría de las personas ha dejado de prestar atención a la planta. Los ejemplares de las fotografías proceden de la colección carpológica del Real Jardín Botánico de Edimburgo. Este tipo de colecciones ayudan a la conservación de las plantas porque permiten aprender acerca de su función. Cada espécimen frágil, seco y a menudo confuso representa una pequeña muestra del abanico de estrategias a los que recurre la vida para perpetuarse.

—Leslie Nemo es periodista científica especializada en salud y medioambiente.



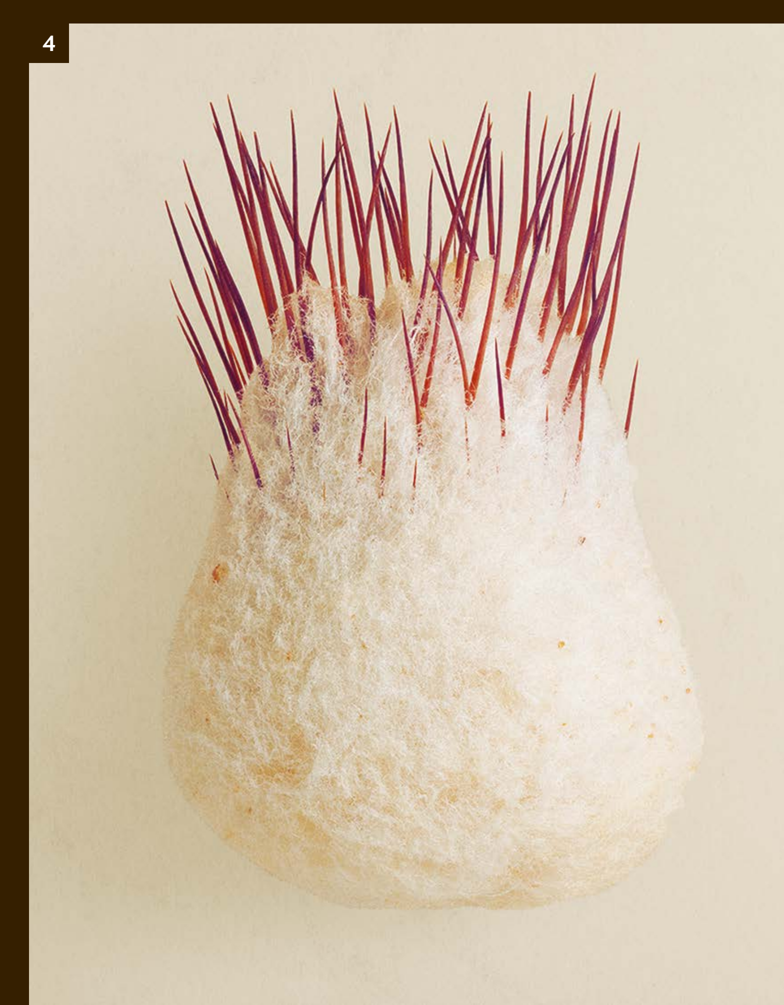


2



3

4



1 FRUTO CIRCULAR de *Anthyllis circinnata*, habitante de una amplia región que abarca desde la cuenca mediterránea hasta la península arábiga. Otras plantas del género *Anthyllis* son conocidas por su capacidad para absorber metales pesados, motivo por el que han sido estudiadas como descontaminantes del suelo.

2 LAS SEMILLAS DE RICINO (*Ricinus communis*) contienen un potente veneno, la ricina, pero en uno de sus extremos poseen un nódulo amarillento repleto de grasas que es muy nutritivo para las hormigas jóvenes. Después de acarrear la cosecha hasta el hormiguero y arrancar la parte deliciosa, las obreras lanzan el resto a la pila de desechos, donde la futura planta comienza a germinar.

3 DE ASPECTO INTIMIDANTE, estos frutos pertenecen a la planta acuática *Trapa natans*, una especie que ha formado parte de la alimentación humana desde el Neolítico. Cuando los pétalos verdes de aspecto similar a hojas que protegen la base de la flor se endurecen, se transforman en las espinas aguzadas visibles en la fotografía.

4 EL FRUTO BLANCO de *Eriosyce aurata* mantiene húmedas y protege del calor abrasador las semillas que alberga en su interior. El mismo fruto posee su propia protección: la vaina erizada anuncia las espinas que brotarán en el cactus adulto.

por Tatiana Kasperski



Tatiana Kasperski investiga en el Departamento de Humanidades de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona. Es experta en la historia de la energía nuclear en la antigua Unión Soviética.

Políticas de memoria nuclear

Lecciones del desastre de Chernóbil en Bielorrusia

En noviembre de 2020, la antigua república soviética de Bielorrusia inauguró en el distrito de Astraviets su primera central nuclear. Construida por la empresa pública rusa Rosatom, la instalación entró en funcionamiento pese a la grave crisis política y a las protestas masivas ante el fraude de las recientes elecciones presidenciales. El arranque del reactor era de vital importancia para el autoritario presidente de la república, Aleksandr Lukashenko, en el poder desde 1994.

En la ceremonia inaugural, Lukashenko proclamó con orgullo que el país acababa de convertirse en una potencia nuclear. Pero la historia nuclear de Bielorrusia no comienza ni con Lukashenko ni con Astraviets. A principios de los años ochenta, la entonces república soviética planeaba la construcción de dos centrales nucleares. Ambos proyectos fueron desechados tras el accidente de Chernóbil en 1986 y el colapso de la Unión Soviética en 1991. En 1998, una comisión científica descartó la construcción de una central nuclear dado el terrible legado de Chernóbil: cerca del 70 por ciento de la radiactividad emitida tras el accidente había caído sobre una cuarta parte del territorio nacional. En 2008, sin embargo, el Gobierno bielorruso decidió reactivar los planes, y el 15 de marzo de 2011, a los pocos días del desastre de Fukushima, firmó un acuerdo con Rusia para la construcción de la central de Astraviets.

¿Por qué fue tan poco cuestionado este proyecto, incluso en el marco de las movilizaciones contra Lukashenko? ¿Cómo ha podido Bielorrusia olvidar Chernóbil y dejarse seducir por el átomo civil? Las razones para ello cabe buscarlas en la construcción de un discurso nacional y nacionalista sobre el desastre, así como en la progresiva normalización de la contaminación radiactiva en las zonas afectadas por el accidente.

La gestión de la crisis

Las autoridades soviéticas no estaban preparadas para hacer frente al accidente de Chernóbil. Si en un primer momento fueron incapaces de apreciar la gravedad de la situación, luego engañaron a la opinión pública sobre el peligro que entrañaba. La evacuación se demoró 36 horas, y los 100.000 efectivos civiles y militares enviados a la zona estaban mal equipados y desconocían los riesgos a los que se enfrentaban. Aun así, las autoridades trabajaron para dar la impresión de que la situación estaba bajo control. Los medios, supervisados por el Estado, dieron cuenta del heroísmo del pueblo soviético en la lucha contra la radiación y pronosticaron un rápido retorno a la normalidad.



EN LAS AFUERAS DE CHERNÓBIL, obra de 1993 del artista bielorruso Víktor Shmatau.

El heroico y optimista discurso oficial prevaleció dos años, aunque no llegó a tranquilizar a la ciudadanía. En 1989, la Perestroika de Mijaíl Gorbachov avivó la indignación popular contra el Gobierno por la forma en que había ocultado la magnitud del desastre. La censura se relajó y se publicaron mapas de contaminación radiactiva. En marzo de 1989, la URSS celebró las primeras elecciones (semilibres) desde la revolución. En los nuevos parlamentos de las repúblicas soviéticas, la campaña y los debates electorales hicieron aflorar más información sobre las consecuencias del accidente.

En la capital bielorrusa, Minsk, así como en las ciudades de las regiones más afectadas por la tragedia, se convocaron docenas de manifestaciones de protesta. Un movimiento nacionalista encabezado por el Frente Popular Bielorruso (FPB) hizo de Chernóbil la bandera de la crítica a las autoridades comunistas. El FPB calificó Chernóbil de «genocidio radiactivo» y «crimen contra las generaciones presentes y futuras de Bielorrusia», proclamando que solo la independencia política, económica y cultural de la república garantizaría el renacimiento nacional y el rescate de las poblaciones afectadas.

Entre las grandes manifestaciones organizadas por el FPB destaca la célebre Marcha de Chernóbil, que ha acabado siendo un acontecimiento anual. Y aunque los nacionalistas no alcanzaron el poder tras la desaparición de la Unión Soviética, Chernóbil adquirió a ojos de la opinión pública una dimensión nacional indeleble.

Narrativas opuestas

El breve período de democratización acabó en 1994 con la elección de Lubashenko como presidente. Con el establecimiento gradual de un régimen autoritario, la escena política cristalizó en dos bandos: el de partidarios y opositores al régimen. Como consecuencia, el discurso público sobre Chernóbil se articuló también en torno a narrativas nacionales opuestas.

El discurso oficial adoptó elementos del soviético, como la retórica militar y el paralelismo entre Chernóbil y la Segunda Guerra Mundial. Para el régimen de Lukashenko, el pueblo bielorruso se había enfrentado a la tragedia de Chernóbil con heroísmo y sacrificio. El paralelismo con la Segunda Guerra Mundial y la derrota del nazismo sugería que los bielorrusos iban también a salir victoriosos de esta nueva batalla.

Haciéndose eco del discurso de renacimiento nacional usado por los opositores al régimen comunista de finales de los ochenta, Lukashenko ha recurrido posteriormente a la metáfora del «renacimiento de las tierras de Chernóbil». Ha tachado de brutal la política de evacuación y reasentamiento, y ha animado a los bielorrusos a no aceptar pasivamente la pérdida de sus casas y sus tierras. En sus visitas rituales a las zonas contaminadas en el aniversario de la tragedia, Lukashenko suele destacar el éxito de su política de revitalización, felicitando a los trabajadores, posando con niños en brazos y, en definitiva, escenificando la recuperación de la normalidad.

Por su parte, el discurso de la oposición bielorrusa bebe del de la oposición nacionalista al Gobierno comunista de los ochenta, presentando a la martirizada nación bielorrusa como víctima de la política colonialista de Moscú. Para esta narrativa, Chernóbil es un crimen del régimen comunista contra el pueblo bielorruso equiparable a la represión estalinista que diezmó la inteligencia bielorrusa en los años treinta. Cada año, en la Marcha de Chernóbil, los manifestantes conmemoran el desastre y recuerdan a sus víctimas. Vinculan la memoria del accidente con su crítica al régimen de Lukashenko, al que califican de auténtico «Chernóbil político».

No son las únicas voces que se han dejado oír. A principios de los noventa, pequeñas asociaciones de víctimas, así como ONG humanitarias y ambientales, promovieron memorias colectivas que desbordaban el marco nacional. Sin embargo, el endurecimiento del régimen limitó la capacidad de acción de las ONG y favoreció su invisibilización en el espacio público, con lo que la pluralidad de memorias del accidente se fue reduciendo de manera paulatina. Al definir la catástrofe en términos esencialmente nacionales, se vació la memoria de Chernóbil de otros significados. La «nacionalización» del accidente ha invisibilizado las diferencias regionales y los problemas específicos de la población en las zonas más contaminadas. También ha comportado su dilución en otros episodios traumáticos del pasado nacional, como la Segunda Guerra Mundial o la represión estalinista.

«Normalidad» contaminada

¿Qué influencia ha ejercido sobre la memoria pública de Chernóbil la gestión de la lluvia radioactiva en Bielorrusia? Cientos de miles de bielorrusos se enfrentan a diario a la contaminación radiactiva. Los esfuerzos del Gobierno por volver a la «normalidad» y rehabilitar las zonas afectadas han dado pie a una serie de paradojas. Mientras el Estado promueve la revitalización de dichas regiones, sus representantes locales no dejan de recordar a la población los riesgos de la contaminación. La normalización resulta así de la adaptación activa de la población a los efectos del accidente, y de la indiferencia ante la falta de normalidad.

La polución radiactiva crea un entorno particular que exige un comportamiento apropiado. El Estado bielorruso ha enseñado a la población local a vivir con la radiactividad. Los expertos oficiales, científicos y médicos, con el apoyo de organizaciones internacionales, prescriben las reglas de comportamiento para evitar la ingesta de sustancias contaminadas. Tales normas incluyen listas interminables de estándares alimentarios, alimentos que deben evitarse, procedimientos para la preparación de las comidas, normas de limpieza e higiene, así como restricciones para las actividades al aire libre. Estas recomendaciones ignoran el estilo de vida rural en Bielorrusia, y en la práctica pocos residentes las siguen.

Al imponer esa disciplina, el Estado elude su responsabilidad respecto a las consecuencias del accidente para la salud pública, a la vez que se despolitizan los problemas posteriores. Si alguien sufre los efectos de la radiactividad de Chernóbil, el Estado puede decir que hizo todo lo posible para evitarlo. Las trazas perdurables de radiactividad en el medio natural y en el cuerpo de las personas recuerdan lastimosamente al accidente, pero las víctimas han acabado percibiéndolas como desgracias privadas.

Fin de la memoria pública

Como consecuencia de la nacionalización de la memoria del accidente y de la individualización de la gestión del riesgo radiológico, las memorias privadas y las experiencias individuales de las víctimas de Chernóbil no encuentran expresión pública ni pueden fundamentar reclamaciones políticas. De hecho, los residentes en las zonas afectadas quieren distanciarse de la imagen de víctimas, mientras el discurso de los expertos médicos y científicos, los representantes públicos y los miembros de las organizaciones internacionales suele presentarlos como personas dependientes del Estado, afectadas de trastornos psicológicos, fatalismo y falta de voluntad para seguir las reglas de protección y llevar una vida saludable. La mayoría de ellos prefiere adherirse al discurso oficial sobre la revitalización de las zonas contaminadas y evita toda confrontación con los expertos, que tildan de irracionales las experiencias subjetivas y traumáticas de la catástrofe.

Todo ello explica el apoyo a la energía nuclear por parte de los líderes bielorrusos y de la mayoría de la población. Una poderosa central nuclear simboliza mejor el orgullo nacional que los pobladores enfermos de unas ciudades en ruinas y semiabandonadas. Habiendo padecido la cara oscura de la energía nuclear, muchos bielorrusos querrían ahora aprovechar sus supuestos beneficios, tentados por las élites políticas y científicas del país.

Otros, en cambio, querrían abrir un auténtico debate sobre los riesgos y beneficios de la energía nuclear, incluida la cuestión de su justa distribución. Lukashenko y sus asesores, por su parte, confían en que las imágenes positivas asociadas con la central de Astraviets les ayuden a contrarrestar las críticas al régimen. IyC

PARA SABER MÁS

The politics of invisibility: Public knowledge about radiation health effects after Chernobyl. Olga Kuchinskaya. MIT Press, 2014.
Manual of survival: A Chernobyl guide for the future. Kate Brown. W. W. Norton & Company, 2019.
Les politiques de la radioactivité: Tchernobyl et la mémoire nationale en Biélorussie contemporaine. Tatiana Kasperski. Petra, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Chernóbil, diez años después. Yuri M. Shcherbak en *IyC*, junio de 1996.
La energía nuclear después de Chernóbil. Frank Von Hippel en *IyC*, abril de 2015.
La energía nuclear, diez años después de Fukushima. Aditi Verma, Ali Ahmad y Francesca Giovannini en *IyC*, junio de 2021.

por Naomi Oreskes



Naomi Oreskes es profesora de Historia de la Ciencia en la Universidad Harvard. Es autora de *Why trust science?* (Princeton University Press, 2019) y coautora de *Discerning experts* (Universidad de Chicago, 2019).

El IPCC debe redirigir sus esfuerzos

Ya no hace falta demostrar que los humanos somos los causantes del cambio climático

En 1988 se creó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), una iniciativa conjunta de la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, con el propósito de asesorar a los líderes mundiales sobre los riesgos del cambio climático provocado por la actividad humana. En 1992 se delimitó más específicamente su finalidad, pues la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático definió el concepto de «interferencia antropogénica peligrosa» (IAP) en el sistema climático. Se solicitó a la comunidad científica que concretara qué nivel de cambio climático constituiría una IAP y evaluara sus posibles consecuencias. El pasado mes de agosto, uno de los tres grupos de trabajo del IPCC publicó su sexto informe global. Un medio de comunicación lo calificó de «devastador»; otro lo describió como «sombrío». El aspecto crucial reside en que el documento confirma que la magnitud actual del calentamiento —por encima de un grado Celsius— ha rebasado el umbral de IAP.

El informe se divulgó en un verano catastrófico, azotado por incendios e inundaciones, durante el cual cualquier observador normal pudo presenciar cómo los efectos del cambio climático se manifestaban en tiempo real, lo que sin duda contribuyó a acrecentar el interés de los medios de comunicación y el público. Sin embargo, para quienes hemos seguido el tema, no descubría nada nuevo. Ya en el año 1995, el IPCC concluía que el efecto humano en el sistema climático era «perceptible». En 2001 el grupo nos advertía de que podrían producirse cambios «abruptos e irreversibles»; y en 2007, el calentamiento atribuible principalmente a causas humanas era «inequívoco» y estaba acelerando de manera apreciable la pérdida de los glaciares de montaña y de las capas de hielo terrestre, lo que a su vez contribuía a un ascenso significativo del nivel del mar. Ya existían pruebas sólidas de que los fenómenos meteorológicos extremos se estaban intensificando y de que el calentamiento y la acidificación de los océanos amenazaban el futuro de los arrecifes de coral y otras formas de vida marina. Lo novedoso del último informe del IPCC radicaba no tanto en los aspectos científicos como en el tono en el que estaba redactado. En el pasado, los expertos del IPCC habían hecho lo imposible por mantener la calma y no exagerar la situación. Sin embargo, en el último informe se adoptaba un tono alarmista, lo cual no es criticable, pues cuando los hechos resultan inquietantes, parece lógico no solo alarmarse, sino también transmitir esa inquietud a los demás.



No obstante, ello suscita una pregunta para el IPCC: ¿y ahora qué? La respuesta es que los integrantes del Grupo de Trabajo 1 (GT1) den por finalizada su labor y pasen el testigo al resto de los científicos que pueblan la entidad. Muchos desconocen que el IPCC consta de tres grupos de trabajo. El primero de ellos, responsable de las declaraciones del pasado verano, aborda las «bases científicas físicas» del cambio climático. El GT2 se ocupa de «impactos, adaptación y vulnerabilidad», mientras que el GT3 se centra en la mitigación. En otras palabras, el GT2 explora en detalle la importancia del cambio climático y el GT3 trata de averiguar cómo atajarlo. Ahora, a sabiendas de que nos hallamos inmersos en un escenario de interferencia antropogénica peligrosa, ha llegado la hora de dirigir los esfuerzos a impedir que el problema se agrave y a dilucidar cómo adaptarnos a unos cambios ya inevitables. Una medida que podría contribuir a ello sería que el IPCC declarara terminado el trabajo del GT1 y disolviera el grupo.

Al fin y al cabo, si el calentamiento causado por la actividad humana es tan inequívoco como afirman con insistencia estos científicos, ¿para qué necesitamos más informes en los que no se cesará de repetir lo mismo? Deshacer el GT1 respondería a esta cuestión y permitiría a los climatólogos volver a centrarse en la ciencia básica, que constituye, después de todo, aquello para lo que la mayoría de ellos están formados. Además, se fomentaría que la sociedad y los políticos trasladaran su atención a la resolución del problema. Tal cambio de perspectiva exigirá a su vez que prestemos una mayor atención a lo que nuestros economistas, sociólogos, urbanistas y biólogos tienen que aportar; y estos expertos son, en definitiva, quienes componen los otros dos grupos de trabajo del IPCC.

En los últimos 30 años, se han esclarecido aún más los fundamentos físicos que explican los peligros originados por nuestra interferencia en el sistema climático. Sin embargo, nuestra capacidad de abordar el problema parece haberse estancado. Cuando el IPCC se reunió por primera vez en 1988, la concentración de dióxido de carbono atmosférico era de 352 partes por millón. En la actualidad es de 410 y continúa en aumento. Más de la mitad de las emisiones totales se han generado en el tiempo transcurrido desde que el IPCC inició su andadura. El cambio climático ha dejado de ser un asunto de ciencia física. Así pues, agradezcamos la labor de los científicos del clima, que tanto se han esforzado por clarificar el problema, y atendamos a quienes pueden ayudarnos a solucionarlo.

TYRA SCHAD

por Jaime Martínez Valderrama



Jaime Martínez Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio de la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación.

Sobre los alimentos de kilómetro 0

¿Es mejor el modelo alimentario local que el global?

En *El señor de los anillos*, John R. R. Tolkien describe La Comarca como un amable lugar en el que los hobbits viven de lo que les da la tierra: cereales, frutas, madera, productos ganaderos e incluso hierba para cebar la pipa de fumar, uno de sus placeres favoritos. Los sistemas autosuficientes nos resultan seductores. En la actualidad, el modelo de producción local va acumulando seguidores por los beneficios ambientales, sociales y estratégicos que comporta. Sin embargo, no todo son ventajas. En La Comarca hay alternancias entre períodos fríos y calurosos, y húmedos y secos. Durante parte del año no pueden cultivarse ciertos productos, como frutas y hortalizas. Y no existen los cultivos subtropicales: los hobbits desconocen los plátanos y las chirimoyas. Es posible que sufran avitaminosis y se harten de una dieta seguramente bastante monótona.

Alimentarse en exclusiva de productos locales no parece, pues, tan fácil. Tampoco acaba de quedar claro qué significa *local*: ¿un kilómetro entre los huertos y nuestra cocina? ¿Cien? Se ha demostrado que menos de un tercio de la población mundial puede abastecerse de alimentos producidos en ese radio; la mayoría se alimenta de los cultivados a más de mil kilómetros. La localidad también se mide según el número de intermediarios que hay entre el granjero y el consumidor. Cuando no hay ninguno, se asegura una producción más «natural» y tradicional de los alimentos, uno de los puntos fuertes del modelo local.

Pero ¿hasta qué punto están garantizadas las bonanzas ambientales y las propiedades saludables de los productos locales? Si por local entendemos nacional, hay países de mediano tamaño, como el nuestro, en los que casi puede cultivarse cualquier alimento. Pero otras regiones no lo tienen tan fácil y han de superar importantes obstáculos naturales. En los países centroeuropeos los invernaderos permiten mantener temperaturas de producción adecuadas. Sin embargo, su huella de carbono es mayor que la que resulta de importar hortalizas del sur de Europa. Arabia Saudí, en su afán autárquico, intentó integrar su producción láctea. Cultivó alfalfa en el desierto para alimentar a las vacas, que debían refrigerarse para soportar temperaturas de más de 50 grados centígrados. El coste energético de ese modelo local era enorme, solo soportado por el petróleo barato del país. A los pocos años los acuíferos se agotaron y ahora la alfalfa y otras materias primas llegan desde lugares como Arizona.

En la otra cara de la moneda tenemos el consumo global, que nace de la ineficiencia económica de los modelos locales. Una forma de mejorar la rentabilidad es especializar la producción. Se buscan los lugares donde las condiciones ambientales son las más propicias para cada producto, se cultivan de forma masiva para reducir los costes y cada vez menos agentes concentran un negocio que tiende a dispersarse.



GETTY IMAGES/MARCO_DE_BENEDICTIS/ISTOCK

¿Por qué nos planteamos retomar lo local? Porque las soluciones aportadas por el modelo global, por su propia dinámica interna, se han deformado hasta el ridículo. Si lo local es vulnerable, no lo es menos un país que se dedica a cultivar únicamente soja o plátanos. Puede que, desde un punto de vista energético, sea más eficiente producir ciertos productos en un lugar y después llevarlos a la otra punta del globo. Pero ese esquema encierra paradojas poco sostenibles, como que, en octubre de 2021, España importara 181 toneladas de manzanas de Alemania y exportara otras 415 al mismo país. O que una manzana producida a un kilómetro de nuestra casa sea más cara que una procedente de Chile.

Pero el verdadero talón de Aquiles del modelo global es la pérdida de la calidad de los alimentos. Para que estos soporten viajes tan largos no pueden cosecharse en el punto óptimo de maduración y necesitan aditivos, empaquetamiento y transporte refrigerado. En el fondo sabemos poco de lo que llega a nuestro estómago. Un ejemplo son los helados y otros productos que contienen óxido de etileno, un plaguicida cancerígeno prohibido en la Unión Europea pero no en los países de origen. O el caso extremo citado por Brian Halweil, del Instituto Worldwatch, en su obra *Eat here*: en la etiqueta de un zumo de naranja podemos leer que está hecho a base de concentrado procedente de Alemania, Austria, Italia, Hungría, Argentina, Chile, Turquía, Brasil, China y EE.UU.

En general, los estudios coinciden en los beneficios sociales y saludables del modelo de producción local. Sin embargo, no hay tanto consenso sobre sus bondades económicas y ambientales. En mi opinión, una transición hacia lo local es necesaria, ya que no solo comporta los beneficios mencionados, sino también otros comunitarios o nacionales, como la conservación de un sector tan estratégico como el alimentario. No obstante, no podemos prescindir por completo del modelo global. La gran mayoría de la población habita en ciudades grandes y densas, lo que dificulta seriamente vivir de lo que da el campo de al lado. La producción de comida depende de abonos y otros insumos asociados, en última instancia, al consumo de combustibles fósiles. Una verdadera transición requeriría independizarse de ellos, pero no todo el mundo está dispuesto a pagar más por los alimentos. Nuestras decisiones como consumidores ayudarán a ese cambio, aunque nunca fue fácil salir de la zona de confort.



FÍSICA CUÁNTICA

Un algoritmo que diseña experimentos cuánticos

Un sistema de aprendizaje automático está realizando avances sorprendentes en la vanguardia de la mecánica cuántica experimental

Anil Ananthaswamy

Ilustración de Kotryna Zukauskaite

Un día de principios de 2016, el físico cuántico Mario Krenn estaba sentado en un café de Viena, escudriñando unos papeles impresos. Trataba de entender lo que había encontrado MELVIN, un algoritmo de aprendizaje automático que había desarrollado él mismo. La misión de esta inteligencia artificial era mezclar y conectar elementos básicos de experimentos cuánticos estándar para resolver problemas nuevos. Y descubrió muchas soluciones interesantes, pero había una que no tenía sentido. «Lo primero que pensé fue "hay un error en mi programa porque esta solución no puede existir"», relata Krenn.

MELVIN parecía haber logrado crear unos estados entrelazados muy complejos de múltiples fotones. (Los estados entrelazados son los que llevaron a Einstein a invocar el espectro de la «acción fantasmal a distancia».) Krenn, Anton Zeilinger, de la Universidad de Viena, y sus cola-

boradores no le habían suministrado explícitamente a MELVIN las reglas necesarias para generar estados tan intrincados, y aun así había hallado el modo de hacerlo. Al final, Krenn se percató de que el algoritmo había redescubierto un tipo de montaje experimental diseñado a principios de los años noventa. Pero esos experimentos habían sido mucho más simples que el problema que resolvió MELVIN. Según Krenn, que ahora trabaja en la Universidad de Toronto, «una vez que comprendimos lo que estaba pasando, enseguida pudimos generalizar [la solución]».

Desde entonces, otros equipos han comenzado a realizar los experimentos que identificó MELVIN, y eso les ha permitido verificar de nuevas maneras las bases conceptuales de la mecánica cuántica. Entretanto, Krenn, junto a otros colegas de Toronto, ha refinado sus algoritmos de aprendizaje automático. Su último proyecto, una inteligencia artificial llamada THESEUS, ha subido el listón: es varios órdenes de magnitud más veloz que MELVIN, y además sus resultados son más fáciles de interpretar. A Krenn y sus colaboradores les llevaba días o incluso semanas entender las divagaciones de MELVIN, pero ahora pueden comprender casi de inmediato lo que les dice THESEUS. «Es un trabajo magnífico», afirma Renato Renner, investigador del Instituto de Física Teórica de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich ajeno al proyecto, pero que revisó un estudio de 2020 sobre THESEUS.

Krenn se embarcó en este programa de investigación casi por accidente, cuando él y su equipo estudiaban cómo crear experimentalmente estados cuánticos de fotones entrelazados de una manera muy concreta. Cuando dos fotones interaccionan, se entrelazan y podemos describirlos matemáticamente mediante un solo estado cuántico común. Medir el estado de uno de los fotones fija al instante el estado del otro, aunque ambos se hallen a kilómetros de distancia (de ahí que Einstein se refiriera despectivamente al entrelazamiento como «fantasmal»).

En 1989, Daniel Greenberger, el difunto Michael Horne y Zeilinger describieron un estado entrelazado que ahora se conoce como GHZ, por las iniciales de sus apellidos. En él intervenían fotones, cada uno de los cuales podía estar en una superposición de dos estados 0 y 1 (cada fotón constituía lo que se denomina un qubit). El estado GHZ de su artículo conllevaba el entrelazamiento de cuatro qubits, de modo que el sistema total estaba en una superposición cuántica bidimensional de los estados 0000 y 1111. Así, si midiésemos uno de los fotones y lo hallásemos en el estado 0, la superposición colapsaría y los demás fotones estarían también en el estado 0 (y de manera análoga si el resultado de la medición fuese 1). A finales de los noventa, Zeilinger y su equipo observaron por primera vez estados GHZ con tres qubits en un experimento.

Krenn y su equipo perseguían estados GHZ de dimensión superior. Querían trabajar con fotones que actuasen como «qutrits», es decir, que pudiesen adoptar tres estados 0, 1 y 2. En concreto, buscaban entrelazar tres fotones para crear un estado GHZ tridimensional que fuera una superposición de 000, 111 y 222. Tales estados son importantes para alcanzar comunicaciones cuánticas seguras y una computación cuántica más rápida.



Anil Ananthaswamy es periodista científico especializado en física y ciencias del espacio. Es autor de los libros *The edge of physics, The man who wasn't there* y *Through two doors at once: The elegant experiment that captures the enigma of our quantum reality.*

A finales de 2013, los investigadores pasaron semanas diseñando experimentos en la pizarra y haciendo cálculos para ver si sus montajes lograban generar los estados cuánticos deseados, pero fracasaron una y otra vez. «Yo pensaba: "Esto es absurdo. ¿Por qué no damos con un montaje?"», rememora Krenn.

Para acelerar el proceso, Krenn escribió un programa informático que partía de una configuración experimental y computaba el resultado del experimento. Luego mejoró su algoritmo, permitiendo que incluyera en sus cálculos los elementos que usan los físicos experimentales para crear y manipular fotones en un banco óptico: láseres, cristales no lineales, divisores de haz, desfasadores, hologramas y otros dispositivos. El programa mezclaba y conectaba al azar esos elementos básicos, realizaba los cálculos y generaba el resultado. Así nació MELVIN. «En pocas horas, el programa encontró una solución que nosotros (tres científicos experimentales y uno teórico) llevábamos meses buscando», comenta Krenn. «Fue un día de locos, no podía creer que hubiera sucedido». Entonces dotó a MELVIN de más recursos. Cuando descubría un montaje experimental que resultaba útil, el programa lo añadía a su «caja de herramientas». «El algoritmo lo recuerda e intenta reutilizarlo para obtener soluciones más complicadas», explica Krenn.

Esa versión mejorada de MELVIN era la que tenía perplejo a Krenn en el café de Viena. Había ejecutado el algoritmo con una caja de herramientas que contenía dos cristales, cada uno capaz de generar un par de fotones entrelazados en tres dimensiones. Krenn esperaba que MELVIN descubriese configuraciones donde esos pares de fotones se combinaran para crear estados entrelazados de hasta nueve dimensiones. Pero, como apunta el científico, «en realidad halló una solución muy inusual, que exhibía mucho más entrelazamiento que el resto de estados».

Finalmente, Krenn cayó en la cuenta de que MELVIN había empleado una técnica desarrollada por varios equipos experimentales hace ahora treinta años. En 1991, Xin Yu Zou, Li Jun Wang y Leonard Mandel, que por entonces trabajaban en la Universidad de Rochester, concibieron un método. Y en 1994 Zeilinger, a la sazón en la Universidad de Innsbruck, y sus colaboradores idearon otro. Conceptualmente, el objetivo de ambos experimentos era similar, pero la configuración que diseñó el equipo de Zeilinger es más fácil de entender. Empieza con un cristal que genera un par de fotones *A* y *B*. Los caminos de esos fotones pasan a través de otro cristal, que a su vez puede producir dos fotones *C* y *D*. Las trayectorias que siguen el fotón *A* del primer cristal y el fotón *C* del segundo se solapan exactamente

EN SÍNTESIS

Los físicos han creado algoritmos de aprendizaje automático capaces de diseñar experimentos de mecánica cuántica.

Tales programas mezclan y conectan los dispositivos básicos que suelen emplear los experimentadores para calcular soluciones a problemas nuevos.

Los resultados de esos sistemas de inteligencia artificial son cada vez más fáciles de interpretar, y algunos de los experimentos que han descubierto ya se han llevado a la práctica.

y conducen al mismo detector. Si este salta, resulta imposible saber si el fotón registrado se originó en el primer cristal o en el segundo. Y lo mismo ocurre con los fotones *B* y *D*.

Un desfasador es un dispositivo que aumenta el camino que recorre un fotón, sumándole una fracción de su longitud de onda. Si ponemos un desfasador en uno de los caminos entre los cristales y ajustamos el cambio de fase que induce, es posible provocar interferencias constructivas y destructivas en los detectores. Por ejemplo, cada cristal podría generar 1000 pares de fotones por segundo. Con una interferencia constructiva, los detectores registrarían 4000 pares de fotones por segundo. En el caso de una interferencia destructiva, sin embargo, no detectarían ninguno: el sistema en su conjunto no emitiría ningún fotón, aunque cada cristal estuviese creando 1000 pares por segundo. «Si lo piensas, es una locura», señala Krenn.

La original solución de MELVIN empleaba ese tipo de caminos solapados. Lo que desconcertaba a Krenn era que la caja de herramientas del algoritmo solo incluía dos cristales. En vez de usarlos directamente en el montaje experimental, MELVIN había insertado esos cristales en un interferómetro (un dispositivo que divide la trayectoria de un fotón en dos caminos y luego los recombina). Tras darle muchas vueltas, se dio cuenta de que el montaje que había encontrado MELVIN era equivalente a uno con más de dos cristales, donde cada cristal generaba pares de fotones y los caminos a los detectores se solapaban. Y esa configuración podía usarse para generar estados entrelazados de dimensión superior.

La física cuántica Nora Tischler, que cuando MELVIN daba sus primeros pasos era estudiante de doctorado y trabajaba con Zeilinger en otros temas, permanecía atenta a esos avances. «Estaba más o menos claro desde el principio que ese experimento no existiría si no lo hubiera descubierto un algoritmo», asegura.

Además de generar estados entrelazados complejos, el montaje con más de dos cristales y caminos solapados puede servir para llevar a cabo una versión generalizada de los experimentos de interferencia cuántica con dos cristales que realizó Zeilinger en 1994. Aefraim Steinberg, físico experimental que es colega de Krenn en Toronto pero no ha tomado parte en estos proyectos, se muestra impresionado por lo que logró la inteligencia artificial. «Es una generalización en la que (hasta donde yo sé) no había pensado ningún ser humano durante esas décadas y que podría no habérsele ocurrido a nadie nunca», valora. «Es un gran primer ejemplo de los nuevos territorios que estas máquinas inteligentes pueden llevarnos a explorar.»

En una de esas configuraciones generalizadas con cuatro cristales que emiten un par de fotones cada uno y con caminos solapados que conducen a cuatro detectores, la interferencia cuántica puede crear situaciones donde, o bien saltan los cuatro detectores (interferencia constructiva), o no lo hace ninguno (interferencia destructiva). Hasta hace poco, llevar a cabo este tipo de experimentos era un sueño inalcanzable. Pero en un artículo del pasado marzo, un equipo liderado por Lan-Tian Feng, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, y en el que también participó Krenn anunció que había implementado todo el dispositivo en un único chip fotónico y realizado el experimento. Los investigadores recogieron datos durante más de 16 horas, gracias a la increíble estabilidad óptica del chip fotónico. Algo así habría resultado imposible en un experimento de sobremesa a mayor escala. Para empezar, se habría requerido el equivalente a un metro cuadrado de elementos ópticos perfectamente alineados sobre un banco óptico, explica Steinberg. Más aún, «con que un solo elemento óptico vibrase o se desplazase una distancia similar a la milésima parte del grosor de un cabello humano durante esas 16 horas, podría desaparecer el efecto», añade.

Durante sus primeros intentos de simplificar y generalizar el hallazgo de MELVIN, Krenn y sus colaboradores se percataron de que la solución recordaba a unas estructuras matemáticas abstractas llamadas grafos, que contienen vértices y aristas y se usan para representar relaciones entre pares de objetos. En este tipo de experimentos cuánticos, cada camino que sigue un fotón se simboliza mediante un vértice. Y un cristal, por ejemplo, corresponde a una arista que conecta dos vértices. MELVIN primero producía uno de estos grafos y luego realizaba un «emparejamiento perfecto», una operación matemática que genera un grafo equivalente donde cada vértice está unido a una sola arista. Este proceso simplifica mucho el cálculo del estado cuántico final, aunque todavía es difícil de comprender para los humanos.

Eso ha cambiado con THESEUS, el sucesor de MELVIN, que genera grafos mucho más sencillos. Para ello toma el primer grafo complicado que encuentra y lo reduce hasta que tiene el mínimo número posible de aristas y vértices (de modo que si eliminásemos cualquier elemento adicional, la configuración ya no generaría los estados cuánticos deseados). Esos grafos son más simples que los emparejamientos perfectos de MELVIN, así que es aún más fácil dar sentido a cualquier solución que descubra la inteligencia artificial. Renner está especialmente asombrado por los resultados tan interpretables que produce THESEUS: «La solución está diseñada para minimizar el número de conexiones del grafo», detalla. «Y, como es natural, podemos entender mejor esa solución que un grafo muy complejo.»

Eric Cavalcanti, de la Universidad Griffith, se muestra tan impresionado como cauto ante los resultados. «Esas técnicas de aprendizaje automático constituyen un avance interesante. A un científico que examine e interprete los datos, algunas de las soluciones pueden parecerle nuevas y "creativas". Pero aún falta mucho para poder decir que esos algoritmos tienen ideas realmente novedosas o inventan nuevos conceptos», afirma. «Por otra parte, creo que algún día lo lograrán. Estos son solo pequeños pasos, pero por algo se empieza.» Steinberg coincide: «Por el momento no son más que unas herramientas increíbles», opina. «Y como todas las buenas herramientas, nos permiten hacer cosas que seguramente no habríamos logrado sin ellas.» IyC

PARA SABER MÁS

Automated search for new quantum experiments. Mario Krenn et al. en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. 090405, marzo de 2016.
Machine learning & artificial intelligence in the quantum domain: A review of recent progress. Vedran Dunjko y Hans J. Briegel en *Reports on Progress in Physics*, vol. 81, art. 074001, junio de 2018.
Computer-inspired quantum experiments. Mario Krenn, Manuel Erhard y Anton Zeilinger en *Nature Reviews Physics*, vol. 2, págs. 649-661, noviembre de 2020.
Observation of nonlocal quantum interference between the origins of a four-photon state in a silicon chip. Lan-Tian Feng et al. en **arxiv.org/abs/2103.14277**, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

La realidad de los cuantos. Anton Zeilinger en *IyC*, junio de 2009.
Cruzar la frontera cuántica. Tim Folger en *IyC*, septiembre de 2018.
Acción fantasmal. Ronald Hanson y Krister Shalm en *IyC*, febrero de 2019.
El experimento de la triple rendija. Urbasi Sinha en *IyC*, marzo de 2020.



INFORME ESPECIAL

EL FUTURO DE LA BIODIVERSIDAD

Los humanos intervenimos de forma drástica en los ecosistemas de todo el mundo. La destrucción del ambiente ha desencadenado no solo una crisis climática global, sino también de biodiversidad. Muchas especies se extinguen; otras, aun sin llegar a desaparecer, sufren una grave reducción de sus poblaciones; y otras invaden regiones al otro lado del mundo. Todo ello está provocando un desequilibrio en la composición de las comunidades biológicas y una degradación de los ecosistemas, que dejan de aportarnos servicios fundamentales para nuestra supervivencia. Más aún, la pérdida de biodiversidad y la destrucción ecológica se han asociado con el origen de muchas epidemias. Con ocasión de la Conferencia sobre Biodiversidad de la ONU (COP 15), celebrada entre octubre de 2021 y mayo de 2022, los expertos del presente informe hacen un llamamiento para protegerla. Los autores, además de incidir en algunas de las problemáticas que llevan a la pérdida de la biodiversidad, plantean soluciones para preservarla.

La redacción

SUMARIO



SOSTENIBILIDAD

Manifiesto por la protección de la biodiversidad

El ser humano, pese a depender del ambiente para su supervivencia, lo está alterando a escala mundial. Sin embargo, todavía estamos a tiempo de salvaguardar la diversidad ecológica de nuestro planeta *Josef Settele*

Josef Settele es biólogo agrícola en el Centro Helmholtz para la Investigación del Medioambiente, en Halle, y profesor de ecología en la Universidad Martín Lutero, en Halle-Wittenberg. Junto con Sandra Díaz y Eduardo Brondizio, dirigió el informe de evaluación mundial sobre biodiversidad de la IPBES, publicado en 2019. Asesora al Gobierno federal alemán como miembro del Consejo de Expertos sobre Medioambiente.



En verano de 2020, cuando escribí mi libro *Die Triple-Krise* («La triple crisis»), revisé un trabajo que había realizado junto con otros colaboradores entre 2008 y 2010 sobre los riesgos de la extinción de especies. A partir de los hallazgos científicos, habíamos esbozado una serie de escenarios posibles, entre ellos uno que incluía posibles pandemias y sus consecuencias. Ahora me asombra lo mucho que se aproximan nuestras peores suposiciones a la realidad actual: habíamos previsto decenas de miles de fallecidos, hospitales desbordados, personas obligadas a aislarse y un importante colapso de las economías.

Eso es exactamente lo que el mundo presencia hoy: un virus que ha dado el salto al ser humano y que ha causado víctimas mortales, dolor y luto, así como graves problemas económicos y convulsión social en todos los continentes. Ningún Gobierno puede sostener que desconocía la existencia de tales riesgos. La COVID-19 no es en absoluto la primera enfermedad infecciosa letal que ha llegado a nosotros desde los animales. La malaria, el sida, el ébola, el MERS y el SARS, así como distintas formas de gripe, representan otros ejemplos de zoonosis. Las zonas de amortiguamiento entre la naturaleza y el ser humano desaparecen progresivamente a medida que los bosques se talan y se convierten en pastos, campos, plantaciones o terrenos edificables.

Ni siquiera en tiempos de pandemia la naturaleza logra reponerse. La tala y la quema de la región amazónica demuestran que el saqueo del planeta azul sigue su curso. En las regiones con un elevado número de especies, los virus que aparecen en una especie animal apenas causan daños, dado que los individuos hospedadores son solo ocasionales. Sin embargo, la destrucción de los hábitats conlleva un acusado aumento de la densidad de población de unas pocas especies, lo que favorece tanto la propagación como la mutación de los patógenos. En líneas generales, si nos adentramos en las zonas naturales que quedan, el contacto aumenta y, con él, el riesgo de transmisión de virus del animal al hombre.

CRISIS CLIMÁTICA, EXTINCIÓN DE ESPECIES Y PANDEMIAS

Si no logramos decirle adiós a la ganadería intensiva, nos acecharán peligros similares. Las repercusiones económicas y sociales de la pandemia del coronavirus ponen de manifiesto el precio que podemos pagar si descuidamos el principio de precaución. Hasta ahora, en lo que respecta a la destrucción del ambiente, tales repercusiones no se han tenido en consideración. La toma de conciencia de que la crisis climática, la extinción de especies y las pandemias se hallan interconectadas emerge con demasiada lentitud. Después de todo, la presidenta

EN SÍNTESIS

La supervivencia de nuestra especie depende de la naturaleza y sus servicios ecosistémicos, los cuales se deterioran progresivamente como consecuencia de la degradación del ambiente.

En particular, la drástica disminución de la biodiversidad amenaza el funcionamiento de los ecosistemas en todo el mundo, así como los servicios que nos ofrecen.

La crisis climática, la extinción de especies y las pandemias son mutuamente dependientes y, por tanto, deben abordarse de forma conjunta. Para ello se requiere un cambio social que convierta la sostenibilidad en norma.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/FG TRADE/ISTOCK (*bosque*); GETTY IMAGES/ARTISTGNDPHOTOGRAPHY/ISTOCK (*campo de cultivo*)
SEBASTIAN WIEDLING, UFZ (*fotografía del autor*)

Pérdida de servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos representan el potencial de la naturaleza para sustentar de forma continuada y sostenible la calidad de vida humana. Se pueden subdividir en servicios de regulación, de soporte y culturales. A veces un mismo servicio ecosistémico presenta varios indicadores que contribuyen al bienestar humano. En casi todos los ámbitos se observa una tendencia descendente a escala mundial.

	Servicios ecosistémicos	Tendencia global en 50 años	Indicadores destacados
Regulación	Creación y mantenimiento de hábitats	↓	Disponibilidad de hábitats adecuados
		↓	Integridad de la biodiversidad
	Polinización y dispersión de semillas	↓	Diversidad de polinizadores
		↓	Expansión de elementos naturales en terrenos agrícolas
	Mejora de la calidad del aire	↘	Depuración de contaminantes atmosféricos
	Regulación del clima	↘	Captura de gases de efecto invernadero
	Amortiguación de la acidificación de los océanos	→	Captura de carbono
	Regulación de la cantidad de agua dulce	↘	Distribución de aguas superficiales y subterráneas
	Mejora de la calidad de aguas dulces y costeras	↘	Filtrado de agua
	Estructuración, protección y descontaminación de los suelos	↘	Fijación del carbono orgánico
	Contención de riesgos y fenómenos extremos	↘	Amortiguación de riesgos
	Control de plagas y enfermedades	↓	Expansión de elementos naturales en terrenos agrícolas
		↘	Diversidad de huéspedes adecuados
Aprovisionamiento y soporte	Energía	↗	Expansión de tierras agrícolas para la obtención de bioenergía
		↘	Expansión de zonas forestales
	Comida y forraje	↗	Expansión de tierras agrícolas para la obtención de alimentos y forraje
		↓	Abundancia de poblaciones de peces marinos
	Materias primas naturales	↗	Expansión de tierras agrícolas para la producción de materiales
		↘	Expansión de zonas forestales
	Recursos medicinales, bioquímicos y genéticos	↘	Proporción de especies útiles desde el punto de vista medicinal
		↓	Diversidad filogenética
Culturales	Educación e inspiración	↓	Número de personas próximas a la naturaleza
		↓	Biodiversidad como estímulo para el aprendizaje
	Experiencias físicas y psicológicas	↘	Expansión de terrenos naturales y tradicionales, así como de las zonas marinas
	Apego a la tierra natal	↘	Continuidad del vínculo con el territorio
	Opciones de futuro	↓	Probabilidad de supervivencia de las especies
		↓	Diversidad filogenética

Peor ⟷ Mejor

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN: «IPBES (2019): GLOBAL ASSESSMENT REPORT ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES OF THE INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES»; EDUARDO S. BRONDIZIO ET AL. (EDITORES). SECRETARIADO DE LA IPBES, BONN, ALEMANIA, 1148 PÁGS., MAYO DE 2019.

de la Comisión Europea, Ursula von der Leyen, reconoció en febrero de 2021 que, «si no tomamos medidas urgentes para proteger nuestra naturaleza, tal vez nos hallemos ante el inicio de una era de pandemias».

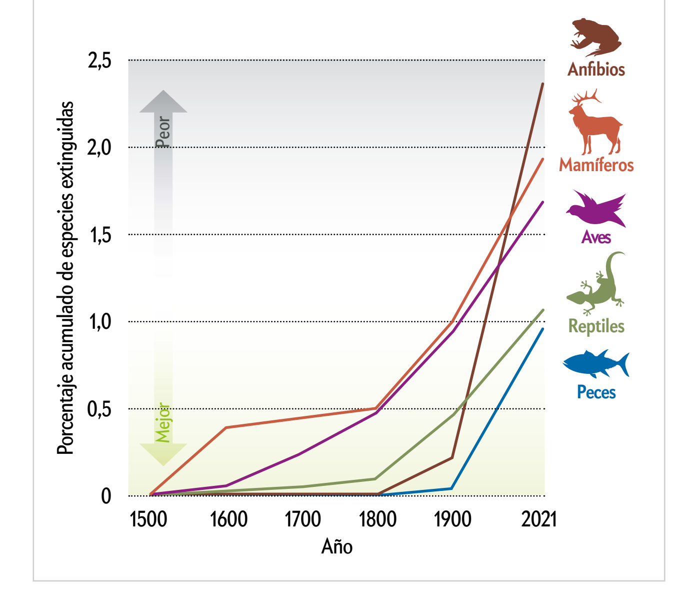
A pesar de las graves amenazas y nuestro persistente fracaso en controlarlas, estoy convencido de que todavía podemos encaminar los avances futuros en la dirección correcta. Pero para ello debemos empezar a encarar de una vez por todas los motivos económicos, sociales y tecnológicos de base que causan la destrucción de la naturaleza.

Entre octubre de 2021 y mayo de 2022, los casi 200 Estados firmantes del Convenio sobre la Diversidad Biológica prevén adoptar, en su 15.ª reunión (Conferencia de las Partes sobre Diversidad Biológica, o COP 15 CBD), en Kunmíng, China, un marco global para la protección de la biodiversidad. En su informe de evaluación mundial, la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) documentó en mayo de 2019 el modo en que la intervención humana había mermado la biodiversidad y degradado los ecosistemas en los últimos cincuenta años. Esa primera evaluación integral de la naturaleza pone de manifiesto que el ser humano, pese a depender del ambiente, lo altera a una escala verdaderamente planetaria. Sin embargo, el informe también muestra algunas vías para salir de la crisis de la biodiversidad combinando sistemáticamente los conocimientos indígenas y locales con los últimos avances en el ámbito de las ciencias naturales y sociales. Sus principales conclusiones suponen la base del presente manifiesto.

DESAPARICIÓN DE ESPECIES

Un índice de extinción cada vez mayor

La extinción de grupos de vertebrados ha aumentado progresivamente desde el siglo XVI. La tendencia negativa se aceleró especialmente el siglo pasado. En condiciones naturales, el índice de extinción anual oscilaría entre 0,1 y 2 especies por millón.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN: «IPBES (2019): GLOBAL ASSESSMENT REPORT ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES OF THE INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES»; EDUARDO S. BRONDIZIO ET AL. (EDITORES). SECRETARIADO DE LA IPBES, BONN, ALEMANIA, 1148 PÁGS., MAYO DE 2019.

Las aportaciones vitales de la naturaleza a la humanidad, conocidas también como servicios ecosistémicos, se producen en casi todos los planos de la existencia humana. Sin embargo, ni las políticas gubernamentales ni la dinámica del mercado suelen reflejar todo su valor. No es de extrañar pues que, en las últimas décadas, la capacidad de la naturaleza para regular los procesos ambientales de forma beneficiosa haya disminuido en todo el mundo. Entre tales procesos destacan el mantenimiento de la calidad del aire y el agua, el desarrollo de suelos sanos, la polinización de los cultivos o la protección de las costas.

La pérdida de hábitats costeros implica un mayor riesgo de inundaciones y daños causados por tormentas en las regiones litorales, cuya población oscila entre 100 y 300 millones de habitantes. La drástica reducción de la biomasa de insectos polinizadores afecta a más del 75 por ciento de los cultivos alimentarios y pone en riesgo las cosechas mundiales, valoradas entre 200.000 y 500.000 millones de euros anuales. Asimismo, hemos perdido parte de las aportaciones inmateriales de la naturaleza a la calidad de vida humana, como la educación, la inspiración, las experiencias físicas y psicológicas o el apoyo al sentimiento de apego a la tierra natal.

No obstante, existen excepciones a ese declive. Por ejemplo, el rendimiento de la madera y el pescado ha aumentado casi un 50 por ciento desde 1970, y el valor de la producción agrícola se ha triplicado aproximadamente hasta alcanzar unos 2,2 billones de euros en 2016. Sin embargo, entre las aportaciones materiales, algunos indicadores muestran un fuerte descenso, como las poblaciones de peces marinos, que se han visto reducidas. A ello se suma la distribución desigual de la creciente producción: si bien la desnutrición ha disminuido a escala mundial en las últimas dos décadas, más de 800 millones de personas sufren todavía una escasez crónica de alimentos.

La disminución de casi todos los servicios ecosistémicos guarda una relación directa con el aumento global de la producción de bienes de consumo. Estamos forzando la explotación de la naturaleza para poder satisfacer el ritmo de la creciente demanda que hemos creado. Desde 1970, la población mundial se ha duplicado, el consumo per cápita ha crecido en un 45 por ciento, el valor de la actividad económica mundial se ha cuadriplicado y el comercio mundial se ha multiplicado por diez. En el mismo tiempo, la desaparición de seres vivos de la naturaleza ha aumentado en más del 200 por ciento.

El ser humano ha alterado directamente tres cuartas partes de la superficie terrestre; dos tercios de la superficie oceánica sufren cada vez más los efectos de la actividad humana; cerca del 85 por ciento de los humedales han desaparecido desde el año 1700; y el 77 por ciento de los ríos con longitudes superiores a 1000 kilómetros ya no fluyen libremente desde su nacimiento hasta el mar. Los ecosistemas costeros han experimentado algunas de las catástrofes más grandes y rápidas de los últimos tiempos. La población de corales vivos se ha reducido casi a la mitad en los últimos 150 años. De no frenar el cambio climático de forma contundente, puede que gran parte de los arrecifes de coral desaparezca este siglo.

La biomasa global de la vegetación se ha reducido a la mitad a lo largo de la historia de la humanidad; actualmente, los bosques solo cubren unos dos tercios del área que ocupaban en tiempos preindustriales. Aunque la pérdida de los bosques se ha ralentizado desde la década de los ochenta, en muchas regiones tropicales sigue progresando a toda velocidad, y la creciente reducción de los bosques en las regiones templadas

y septentrionales viene acompañada de una fragmentación y una pérdida de funciones de los ecosistemas forestales, como el almacenamiento de carbono.

En un futuro próximo, cerca de un millón de los ocho millones de especies animales y vegetales estimadas se hallarán en peligro de extinción si no tomamos medidas. En general, las poblaciones de fauna silvestre, tanto terrestre como acuática, siguen disminuyendo. Desde la extinción de la megafauna a finales del Pleistoceno, la biomasa global de mamíferos salvajes se ha reducido en más de tres cuartas partes y hoy representa menos del 10 por ciento de la biomasa que compone la población humana. En cuanto a los grandes peces depredadores, fundamentales en nuestra dieta, su biomasa se ha reducido en dos tercios en los últimos 100 años. Pero otros vertebrados, como los reptiles, las aves y, sobre todo, los anfibios, están desapareciendo.

Nuestras plantas de cultivo y razas de animales domésticos no son una excepción. Las plantas silvestres amenazadas que están emparentadas con las de cultivo no suelen estar protegidas, lo que pone en peligro la variabilidad genética en la que se basa la resiliencia a largo plazo de la producción agrícola de alimentos contra el estrés ambiental.

El ascenso de las temperaturas y las variaciones en las precipitaciones sitúan a muchas especies en el límite de su tolerancia biológica. Si no se adaptan a los cambios con rapidez, se ven forzadas a abandonar su hábitat o terminan por extinguirse

Entre las causas inmediatas de la alteración de los sistemas biológicos figuran, en primer lugar, los cambios en el uso y la explotación de la tierra y el mar mediante la agricultura, la ganadería o la pesca. El cambio climático inducido por los humanos adquiere un peso cada vez mayor en la destrucción de la biosfera. El aumento de las temperaturas y las variaciones en las precipitaciones sitúan a muchas especies en el límite de su tolerancia biológica. De este modo, se ven forzadas a adaptarse con extrema rapidez a las nuevas condiciones o a abandonar su propio hábitat, o incluso terminan por extinguirse. Por otro lado, los ecosistemas desequilibrados pierden la capacidad de absorber y secuestrar gases de efecto invernadero, de hacer frente a los fenómenos meteorológicos extremos y de adaptarse al cambio climático, y de proporcionarnos importantes servicios ecosistémicos, como el agua potable y el aire limpio. Aunque la crisis climática y la pérdida de la biodiversidad se hallan estrechamente relacionadas entre sí, hasta ahora han estado en buena parte divorciadas en los planos científico y político. Sin embargo, dada la elevada tensión en ambos ámbitos, la protección del clima y de las especies, tras décadas de vacilación, requieren ahora respuestas rápidas y consensuadas, así como una serie de transformaciones sociales.

Sin embargo, en última instancia, las causas directas del problema vienen determinadas por la influencia indirecta de la demografía, la economía y la política, mutuamente dependientes. Por ejemplo, las medidas de política ambiental pueden mitigar el deterioro ecológico causado por decisiones económicas equivocadas. Por otro lado, ciertos incentivos económicos, como las subvenciones a la pesca, la agricultura, la ganadería, la silvicultura, la minería o la producción de energía, perjudican la naturaleza. Además, las medidas de conservación de la naturaleza pueden tener efectos desiguales. Por ejemplo, algunos países ricos apoyan económicamente la protección ambiental en los más pobres para obtener beneficios globales, como la conservación de determinadas especies o el almacenamiento de carbono a cambio de dinero, aunque a veces a costa de las economías y las sociedades locales.

En vista de tales tendencias, no es de extrañar que no se respeten los acuerdos internacionales destinados a proteger la biodiversidad. En 2010, las Partes del Convenio sobre la Diversidad Biológica adoptaron 20 metas que debían alcanzarse hacia 2020 y que firmaron bajo el nombre de las «metas de Aichi», puesto que el congreso se celebraba en Nagoya, en la prefectura japonesa de Aichi. Entre ellas figuran la lucha contra la pérdida de la biodiversidad, el fomento del consumo sostenible, la protección de los ecosistemas, incluida su diversidad genética, la conservación de especies y el impulso de los servicios ecosistémicos. A casi todas esas metas se les ha pasado el plazo. Tales aspiraciones, a su vez, guardan relación, bien de forma directa o mediante interacciones complejas, con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas, como la lucha contra la pobreza y el hambre o el apoyo a la salud y la educación. Por otro lado, existen importantes mecanismos de retroalimentación entre el ambiente y el desarrollo de la economía y las infraestructuras. La amenaza a la naturaleza pone en peligro el logro de tales objetivos de desarrollo.

Muchos de los objetivos de biodiversidad y desarrollo sostenible deberían establecerse en relación con la alimentación, la energía, el clima y el agua, tanto a escala local como global. La complejidad de los desafíos requiere un enfoque integrador que pueda mitigar el cambio climático, detener la pérdida de la biodiversidad y garantizar la seguridad alimentaria de la población mundial manteniendo las interacciones, las sinergias y el conflicto de objetivos.

Incluso un calentamiento global moderado puede dañar la biodiversidad y poner en peligro los beneficios asociados a los seres humanos. Para limitar el aumento de la temperatura global provocado por las emisiones de gases con efecto invernadero a 1,5 grados Celsius a finales del siglo xxi (objetivo climático de París), se necesitan medidas de protección climática a gran escala, como la reforestación o los cultivos bioenergéticos. Sin embargo, esto último podría tener repercusiones negativas en la biodiversidad, la producción de alimentos y la demanda de agua. Al mismo tiempo, garantizar una nutrición adecuada a toda la población requiere una expansión de las tierras agrícolas, lo que, de nuevo, deteriora la biodiversidad y agrava aún más la crisis climática.

UN CAMBIO HACIA LA SOSTENIBILIDAD

No obstante, ese conflicto de objetivos puede evitarse tomando una serie de medidas. El cambio climático podría mitigarse si nos centramos en restaurar los ecosistemas con un alto contenido de carbono, al tiempo que reducimos el consumo excesivo y los residuos y dejamos de depender de los monocultivos masivos para generar bioenergía. De forma similar, podríamos satisfacer la creciente demanda de alimentos sin aumentar la huella ecológica de la agricultura aumentando la producción agrícola de forma sostenible, cambiando nuestros hábitos alimentarios y evitando el desperdicio de comida.

Para revertir el progresivo deterioro de la naturaleza y combatir a la vez la desigualdad social se necesita un cambio fundamental. En el proceso, el objetivo de la sostenibilidad debe dejar de ser la excepción altruista para convertirse en la norma en todos los sistemas

Para revertir el progresivo deterioro de la naturaleza y combatir a la vez la desigualdad social se necesita un cambio fundamental. En el proceso, el objetivo de la sostenibilidad debe dejar de ser la excepción altruista para convertirse en la norma en todos los sistemas. Esta transformación a favor del bien común exige vencer la resistencia que oponen los derechos adquiridos. Deben empezar a mejorar la implantación y el cumplimiento de las normativas ambientales existentes; hay que reformar las políticas nocivas, como las subvenciones al consumo energético o la extracción de recursos, o bien deben suprimirse por completo.

Para la política, todo ello implica interconectar los diferentes ámbitos. En Alemania, por ejemplo, todos los ministerios federales, entre ellos el de Transporte y el de Economía, deben cooperar para que el Ministerio de Medioambiente ya no sea el único en enarbolar la bandera de las políticas de precaución. Más importante aún es lograr una cooperación internacional que evite exportar la pérdida de especies a través del comercio globalizado y que, en lo relativo a la importación de bienes, no pierda de vista las posibles repercusiones en los países de origen. El arma clave de la Unión Europea es la Política Agrícola Común, que, en lo referente al uso del suelo, todavía sigue apostando por las subvenciones agrícolas y no por las actividades económicas sostenibles orientadas al bien común.

Tal transformación podría catalizarse mediante la colaboración entre los Gobiernos y la sociedad en una serie de cuestiones clave, aunque es probable que algunos cambios encuentren resistencia. Para ello disponemos de cinco instrumentos particularmente adecuados:

1. Incentivos a la responsabilidad ambiental.
2. Cooperación entre disciplinas.
3. Medidas de precaución para prevenir, mitigar y remediar los daños causados a la naturaleza.
4. Fomento de sistemas sociales y ecológicos resistentes.
5. Refuerzo de la legislación ambiental.

También podemos mejorar notablemente el resultado si nos centramos en los siguientes ocho puntos de partida:

1. Concepción de una buena calidad de vida sin necesidad de aumentar continuamente el consumo de bienes materiales.
2. Reducción del consumo global y los desperdicios.
3. Nuevas normas sociales para la sostenibilidad y el consumo responsable.
4. Lucha contra las desigualdades sociales y de género, que socavan la capacidad de sostenibilidad.
5. Reparto equitativo de los beneficios obtenidos por el aprovechamiento de la naturaleza.
6. Consideración (interiorización) de los costes derivados de los daños ambientales causados por las actividades económicas.
7. Establecimiento de técnicas respetuosas con el ambiente.
8. Fomento de la educación y la ciencia, especialmente en lo que respecta a la conservación de la naturaleza y la sostenibilidad.

La pérdida de la biodiversidad, la crisis climática y el objetivo de que todos gocemos de una buena calidad de vida guardan una estrecha relación y deben abordarse con urgencia a escala local y mundial. Por tanto, la preservación de un planeta que sustente y satisfaga la vida de los seres humanos y de otras especies constituye un único reto que no puede afrontarse con «las mismas medidas de siempre». Al contrario, contamos con un amplio espectro de enfoques y herramientas para poder alcanzar juntos la sostenibilidad. Las transformaciones económicas, políticas y sociales necesarias para implementar tales cambios a tiempo y a gran escala pueden lograrse mediante una serie de intervenciones, especialmente en los aspectos clave de los factores indirectos. De ese modo, todavía podemos garantizar la nutrición y el abastecimiento de la humanidad, y al mismo tiempo restaurar los medios de subsistencia de toda la población y preservarlos en el futuro. IyC

PARA SABER MÁS

IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Eduardo S. Brondizio et al. (editores). Secretariado de la IPBES, Bonn, Alemania, 1148 págs., mayo de 2019.
Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. Sandra Díaz et al. en *Science*, vol. 366, eaax3100, diciembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los factores ecológicos en las epidemias. Jaume Terradas en *IyC*, noviembre de 2020.
Frenemos la sexta extinción. Gerardo Ceballos en *IyC*, febrero de 2021.
Más comida, menos desperdicios. Chad Frischmann y Mamta Mehra *en este mismo número*.

CONSERVACIÓN

El ocaso de los anfibios

Las ranas y otros anfibios desaparecen de nuestro planeta. Sufren los estragos de una epidemia de hongos y sus hábitats se hallan en continuo deterioro. Ha llegado el momento de protegerlos

Gunther Köhler



LA RANA ARBORÍCOLA *AGALYCHNIS LEMUR* vive en Costa Rica, Panamá y el noroeste de Colombia. Igual que sucede con otros anfibios de numerosas regiones del planeta, sus poblaciones están disminuyendo drásticamente debido a una micosis.

Gunther Köhler es profesor de herpetología en el Instituto de Investigación y Museo de Historia Natural Senckenberg, en Fráncfort del Meno. Se dedica al estudio de anfibios y reptiles, principalmente en América Latina y el sudeste asiático.



Anochece y la fuerte lluvia remite lentamente. El croar de las ranas se escucha por doquier: los profundos gruñidos vienen acompañados de zumbidos de insectos y silbidos estridentes. Oigo algún que otro «raaak», y por encima de mi cabeza, entre los árboles, un «ping» metálico y un «gog-gog» sordo. Es el 6 de junio de 1992. Me hallo en el bosque tropical de la Selva Negra, en el altiplano central nicaragüense. La temporada de lluvias comenzó hace unos días y las ranas han empezado a reproducirse. A lo largo de la noche cuento casi 20 especies diferentes. Algunos ejemplares están sentados en la orilla de una enorme charca, mientras que otros flotan en la superficie del agua, se aferran a los finos juncos del borde o descansan sobre las piedras del lecho de un arroyo. Descubro anfibios entre los matorrales y en montones de piedras. Otros me espían desde los árboles, a tres o cinco metros de altura. Estoy rodeado de ranas.

Durante la década de los noventa, exploré la región de la Selva Negra al menos una vez al año para estudiar anfibios y reptiles. La acusada reducción de numerosas poblaciones de ranas que observé en ese período ha permanecido dolorosamente en mi memoria hasta hoy. Por ejemplo, mientras que en mis primeros viajes a Nicaragua era habitual ver en los arroyos especies del complejo *Craugastor rugulosus*, en los años siguientes fui encontrando cada vez menos hasta que, de repente, desaparecieron por completo. Al principio atribuí la ausencia de ciertas especies a una fluctuación propia de la dinámica poblacional. Pero cuando la Selva Negra se volvió cada vez más silenciosa, me di cuenta de que algo había cambiado de forma permanente.

Los anfibios, incluidas sus larvas, desempeñan una función fundamental en los ecosistemas terrestres y de agua dulce de todo el mundo. Sin ellos, los flujos de energía y el reciclaje de nutrientes no funcionan debidamente. En consecuencia, su desaparición tiene importantes repercusiones ecológicas en la flora y la fauna.

Por ello, los biólogos y los expertos en ciencias naturales nos alarmamos cuando, en la década de los noventa, supimos que las poblaciones de ranas habían disminuido en otras regiones, especialmente en otros países latinoamericanos y en Australia. Algunas especies incluso habían desaparecido del mapa y se catalogaron como extinguidas. Ni siquiera se salvaban las reservas naturales, donde el hábitat parecía preservarse en buenas condiciones.

No obstante, al principio reinó el escepticismo sobre si realmente nos hallábamos ante una mortalidad de ranas de proporciones mundiales. Se sabe que el número de animales puede variar mucho, sobre todo debido a factores climáticos. En condiciones adversas, su población puede disminuir considerablemente durante unos años para después aumentar hasta recuperar su tamaño original. Por tanto, si no hacemos un seguimiento durante años, resulta difícil discernir entre las fluctuaciones normales de la población y las tendencias a largo plazo.

Sin embargo, los indicios que apuntan hacia una mortalidad generalizada de anfibios no han desaparecido. Por ello, la comu-

EN SÍNTESIS

Desde la década de los noventa, cada vez son más los trabajos que demuestran la desaparición de ranas en distintas regiones de la Tierra. A comienzos de siglo se esclareció que la causa residía en una micosis.

Si bien algunas poblaciones individuales sobreviven a la epidemia, el número de anfibios de nuestro planeta disminuye progresivamente debido a una destrucción generalizada de sus hábitats por acción del hombre.

Las reservas naturales cumplen una función fundamental para salvar a los animales de la extinción. Debemos proteger el ambiente y el clima con más empeño que antes.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/THORSTEN SPOERLEIN/ISTOCK

Expedición en la selva: tras la pista de los anfibios

En agosto de 2002, durante la temporada de lluvias, Gunther Köhler (*izquierda*) y su entonces alumno, Ardiel Zebenzui (*tercero por la izquierda*), realizaron una expedición de dos semanas en la selva tropical del cerro El Toro, una región que forma parte del Parque Nacional Saslaya, en el noreste de Nicaragua. Los acompañaban cinco porteadores y ayudantes, así como diez soldados y agentes de policía, mientras las bandas armadas causaban estragos en la zona. En su expedición, el equipo iba en busca de anfibios y reptiles desconocidos hasta entonces. Junto con otros colaboradores, Köhler ha descubierto 120 especies nuevas de ranas, salamandras, lagartos y serpientes a lo largo de su carrera investigadora. Ya en la década de los noventa, observó durante sus expediciones una disminución, a veces drástica, del número de ranas en los bosques de América Central.



GUNTHER KÖHLER

nidad científica está cada vez más convencida de que se está produciendo un fenómeno dramático. Se ha especulado mucho sobre las posibles causas: encabezan la lista la creciente contaminación, el cambio climático y nuevos tipos de enfermedades infecciosas. Las razones clásicas que explican la pérdida de la biodiversidad, como la agricultura intensiva y la urbanización, se descartaron rápidamente, puesto que muchos de los descensos poblacionales que se observaban se daban en zonas protegidas donde los hábitats naturales no mostraban signos evidentes de alteración.

En 1998 aumentaron las pruebas de que el responsable era el denominado hongo quítrido, de nombre científico *Batrachochytrium dendrobatidis*, un patógeno que causa una enfermedad conocida como quitridiomicosis. Para reproducirse, el hongo produce zoosporas móviles que se dispersan por el agua y pueden infectar a nuevos huéspedes, en este caso a las ranas y sus renacuajos. Hoy no cabe ninguna duda de que la epidemia ha diezmado las poblaciones de ranas en casi todo el mundo y ha eliminado decenas de especies. El hongo también se ha extendido en la mayoría de los países europeos, incluida España.

Hace unos años se identificó otra especie de quítrido, *B. salamandrivorans*, que afecta sobre todo a salamandras y tritones. En Holanda y Bélgica, las poblaciones de salamandras comunes se han reducido considerablemente debido a esta nueva enfermedad. Actualmente se consideran en grave peligro de extinción en ambos países.

En América Central, las ranas más afectadas eran las que vivían en los arroyos de las altitudes medias y se reproducían en el agua. Las especies que vivían principalmente en los árboles, y no necesitaban charcas o arroyos para la reproducción, no mostraban indicios de declive.

Los investigadores han hallado una explicación en las preferencias fisiológicas y ecológicas del hongo, que parece proliferar en ambientes de bosques nubosos, es decir, con elevados grados de humedad y temperaturas situadas entre los 15 y 25 grados centígrados, un clima típico de las altitudes medias centroamericanas. Dado que, además, el hongo se propaga en el medio acuoso, las especies que viven en la superficie o el interior de cuerpos de agua corren un mayor riesgo de infectarse con las

zoosporas del hongo quítrido que las especies que evitan los arroyos o las charcas.

UNA AMPLIA DISTRIBUCIÓN EVITA LA EXTINCIÓN

Las especies distribuidas localmente presentan un mayor riesgo de extinción que las especies con una mayor dispersión geográfica, puesto que las condiciones locales pueden variar mucho dentro de un área grande. En las zonas más amplias aumenta la probabilidad de hallar refugios donde se den las condiciones adecuadas para la supervivencia de la especie. Además, una mayor variabilidad genética disminuye el riesgo de extinción de poblaciones al aumentar la probabilidad de que algunos individuos sobrevivan a la enfermedad.

Las reservas naturales cumplen una función esencial en la protección de los anfibios, pero no bastan. Deben detenerse también amenazas como el cambio climático, las toxinas ambientales o las enfermedades emergentes

Entre los síntomas de la micosis figuran la dilatación de los vasos sanguíneos y el aumento de la queratinización de la superficie cutánea, lo cual dificulta la respiración, dado que los anfibios también respiran a través de la piel, y altera el metabolismo, puesto que la piel puede absorber y liberar fluidos y minerales. Los expertos sospechan que las toxinas de los hongos también podrían tener un efecto de envenenamiento. Por lo general, el estado de las ranas afectadas se deteriora progresivamente hasta terminar muriendo.

Durante mucho tiempo se pensó que la principal responsable de la propagación era una rana africana inmune al efecto del hongo (*véase el recuadro* «La rana boticaria»). Sin embargo, gracias a la secuenciación del genoma, en 2018 se logró localizar el origen del hongo quítrido en Corea. Allí descubrieron una población perteneciente a un linaje predecesor de los hongos. Además, Asia Oriental presenta una elevada variedad de especies, lo que apoya la hipótesis de su origen. Según el estudio, el patógeno probablemente apareció por primera vez en Corea a principios del siglo XX y después se extendió por todo el mundo a través del comercio de anfibios.

Entre 2001 y 2004, el proyecto «Evaluación Mundial de los Anfibios», dirigido por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Conservation International y NatureServe, hizo un balance del grado de amenaza que sufrían casi todas las especies de anfibios conocidas hasta entonces. Los resultados fueron alarmantes: el uno por ciento se consideraban extinguidas y cerca de un tercio de todas las especies de ranas fueron catalogadas como amenazadas. Los trabajos de campo realizados a comienzos de la década de los noventa en la región de Monteverde, en Costa Rica, ya habían demostrado que un total de 20 especies de ranas habían desaparecido desde 1987, lo que equivale al 40 por ciento de la fauna local de ranas. En el norte de Sudamérica, las especies de sapo arlequín (género *Atelopus*) son las más afectadas. Según las estimaciones, cerca de dos tercios de las especies conocidas de este género han desaparecido de sus hábitats cotidianos.

Sin embargo, el hongo quítrido no es el único responsable del declive mundial de la diversidad de anfibios. De hecho, el deterioro y la contaminación de su hábitat siguen siendo las principales causas de su desaparición. Los factores que contribuyen a tal deterioro son la desforestación en curso, el drenaje y la contaminación de los humedales. La fragmentación de los hábitats conlleva poblaciones aisladas más pequeñas que tienen menos oportunidades de dispersión y un mayor riesgo de desaparición. La multitud de toxinas presentes en la naturaleza supone otra presión para los anfibios.

El cambio climático global, y en particular el calentamiento, pueden afectar gravemente a la biodiversidad local y regional.

INMUNE AL HONGO

La rana boticaria

El uso de la rana de uñas africana (*Xenopus laevis*) para realizar pruebas de embarazo le valió el sobrenombre de «rana boticaria». El método consiste en inyectar la orina o la sangre de una mujer en sus sacos linfáticos. Si, pasadas entre 12 y 24 horas, la hembra desova o el macho libera el esperma, la mujer en cuestión se considera embarazada. El método, practicado hasta la década de los sesenta, se extendió por todo el mundo, y con él, la rana de uñas. Su piel se halla colonizada por un hongo que no le resulta nocivo. Sin embargo, muchas otras especies de ranas muestran una reacción más sensible y suelen morir como resultado de una micosis. Cuando, en la década de los noventa, los investigadores observaron una mortalidad de anfibios a escala mundial por causa del hongo, algunos achacaron a la rana de uñas la propagación del patógeno. Sin embargo, los análisis del genoma del hongo indican que este se ha expandido desde el sudeste asiático por todo el mundo.



GETTY IMAGES/HAILSHADOW/ISTOCK



VÍCTIMA DE UNA EPIDEMIA. La especie *Craugastor rugulosus* se ha visto gravemente diezmada por el hongo quítrido. La destrucción de su hábitat amenaza aún más a esta rana.

Un ascenso de las temperaturas puede causar que ecosistemas milenarios dejen de funcionar y colapsen. Además, en algunos lugares se han introducido especies exóticas, lo que puede tener repercusiones negativas en la fauna anfibia local. Los animales compiten ahora por el hábitat y la comida con los recién llegados, que incluso pueden devorarlos. Igualmente, las especies exóticas traen consigo patógenos nuevos que pueden ser peligrosos. A su vez, algunos factores pueden potenciar otros. Por ejemplo, el calentamiento global puede favorecer la propagación de especies invasoras.

RESISTENCIA A LA MICOSIS

Pero también hay buenas noticias. Por ejemplo, sabemos que algunas comunidades de ranas han convivido con el hongo quítrido durante décadas y, sin embargo, no muestran indicios de un descenso poblacional. En la región meridional de la Sierra Madre del Sur hemos comprobado que numerosos renacuajos muestran síntomas típicos de la infección por quítridos, especialmente la pérdida de los dientes córneos. Sin embargo, nuestros estudios de genética molecular no consiguieron demostrar la presencia del hongo en las ranas adultas, lo que hace pensar que los animales logran librarse del patógeno. Posiblemente lo consiguen tomando el sol, ya que el aumento de la temperatura y la luz ultravioleta resultan letales para el hongo. No obstante, se requieren más trabajos de campo y de laboratorio para dilucidar las estrategias que permiten eliminar el hongo.

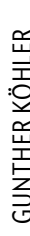
El seguimiento continuo de las poblaciones de ranas también permite ampliar nuestro conocimiento sobre la dinámica de la infección y los efectos a largo plazo de la epidemia. La aparición de una infección dentro de una población de ranas no implica automáticamente el fin de esta o incluso la extinción de una especie. Se conocen casos de poblaciones que se han reducido inicialmente debido a la epidemia de hongos, sin dejar rastro en la naturaleza durante años, o incluso décadas, y que, sin embargo, han reaparecido en algún momento.

Aparentemente, las poblaciones se habían reducido tanto que no era fácil detectarlas. Las ranas supervivientes con suficiente resistencia contra el hongo quítrido fueron capaces de reproducirse de nuevo sin ser advertidas. Cuando la población alcanzó un tamaño suficiente, pudieron volver a identificarse las especies que se daban por perdidas, lo que aviva nuestra esperanza de que todavía existan otras especies de anfibios catalogadas como extinguidas.

Sin embargo, el número de ranas y salamandras de nuestro planeta se está reduciendo progresivamente. ¿Cómo podemos detener o, en el mejor de los casos, revertir el proceso? En muchos lugares podríamos servirnos de las estrategias tradicionales, como la expansión de las reservas naturales y la limitación de la explotación de espacios naturales. Tales medidas siguen suponiendo un componente fundamental de los programas de conservación de la naturaleza a largo plazo. El principio es sencillo: si una especie depende del bosque, desaparecerá si se talan los árboles. La misma lógica se aplica a la mayoría de los otros entornos naturales, como los páramos, los prados y los arroyos. Por tanto, aun sobreviviendo a las infecciones por quítridos, las poblaciones de anfibios siguen estando amenazadas.

Por ese motivo, las reservas naturales, si están gestionadas y protegidas con profesionalidad, cumplen una función fundamental en las estrategias de conservación a largo plazo de los anfibios. Sin embargo, muchas zonas protegidas solo figuran en el mapa y, por tanto, resultan inútiles. Los trópicos carecen especialmente de personal bien formado y de medios operativos. En consecuencia, incluso en las reservas naturales continúa la desforestación, la caza no regulada y el uso de plaguicidas.

Por si fuera poco, los límites de las áreas protegidas no pueden detener el cambio climático, la introducción de toxinas ambientales y las enfermedades emergentes. Por tanto, las estrategias basadas únicamente en reservas naturales no lograrán parar la crisis de la biodiversidad. Se necesitan otras iniciativas para poner freno al calentamiento global, detener la entrada de toxinas en la naturaleza y minimizar la propagación de especies invasoras y enfermedades infecciosas en el reino animal. La mayoría de los científicos concuerdan en que se necesita una concepción global de la protección del ambiente y del clima que vaya mucho más allá de las medidas adoptadas hasta ahora. Ha llegado el momento de ponerse en marcha por el bien de la biodiversidad de nuestro planeta. IyC



GUNTHER KÖHLER

PARA SABER MÁS

Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. David B. Wake y Vance T. Vredenburg en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, págs. 11466-11473, agosto de 2008.

Extinction in our times: Global amphibian decline. James P. Collins y Martha L. Crump. Oxford University Press, 273, 2009.

Field notes on findings of threatened amphibian species in the central mountain range of western Panama. Andreas Hertz et al. en *Amphibian and Reptile Conservation*, vol. 6, págs. 9-30, enero de 2012.

Recent Asian origin of chytrid fungi causing global amphibian declines. Simon J. O'Hanlon et al. en *Science*, vol. 360, págs. 621-627, mayo de 2018.

Amphibian fungal panzootic causes catastrophic and ongoing loss of biodiversity. Ben C. Scheele et al. en *Science*, vol. 363, págs. 1459-1463, marzo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Declive de las poblaciones de anfibios. Andrew R. Blaustein y David B. Wake en *IyC*, junio de 1995.

Los anfibios y la contaminación química. Andrés Egea Serrano, Rick A. Relyea y Miguel Tejedo en *IyC*, octubre de 2013.

ECOLOGÍA

Invasiones biológicas en la región mediterránea

En los últimos decenios, el número de las especies invasoras ha crecido de forma exponencial en nuestros ecosistemas, con la consiguiente pérdida de la biodiversidad local. ¿De qué modo podemos detenerlas?

Montserrat Vilà



EL DIENTE DE LEÓN (*Carpobrotus* spp.), de origen sudafricano, es una especie muy invasora que compite y desplaza otras plantas nativas de la costa mediterránea.

Montserrat Vilà es investigadora de la Estación Biológica de Doñana, del CSIC. Estudia la ecología de las invasiones biológicas, en especial las que afectan a los ecosistemas mediterráneos. Es miembro del Foro Científico para la regulación europea de las especies invasoras.



Desde tiempos remotos, la cuenca del Mediterráneo ha sido cuna de intercambios comerciales entre distintas civilizaciones y culturas. El movimiento de bienes y productos, casi siempre acompañado de migraciones humanas y la fundación de nuevos asentamientos, ha conllevado la importación de especies foráneas, a menudo de regiones muy lejanas, que jamás habrían llegado por sus propios medios de dispersión. Estas especies recién introducidas quizá no logren prosperar en el nuevo lugar, o tal vez solo se propaguen muy lentamente y de forma muy localizada. Pero con frecuencia se asientan y se expanden con rapidez en los ecosistemas de acogida y alteran su funcionamiento y su composición de especies. En ese caso, a las especies exóticas se las denomina invasoras.

ACCIDENTE O INTENCIÓN

Los mayores intercambios de especies, o quizás los mejor documentados, se produjeron a partir del siglo xv, fruto de los primeros viajes transoceánicos y la colonización de territorios más allá del continente europeo. Sin embargo, la entrada de especies exóticas y la posterior invasión de estas en espacios naturales han aumentado de forma notable en las últimas décadas como consecuencia de la intensificación de las rutas comerciales, así como del desarrollo de infraestructuras que facilitan la expansión de las especies. Ejemplos de ello son el mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*), el cangrejo americano (*Procambarus clarkii*) o las cotorras argentinas (*Myiopsitta monachus*), por citar algunas cuyo éxito de invasión se ha producido no solo en los ecosistemas mediterráneos, sino también en muchas otras regiones del mundo.

La introducción de especies exóticas se ha realizado tanto de forma intencionada como accidental, aunque ha prevalecido la primera. Así, numerosas especies animales se han importado por su interés como fuente de alimentación, como la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*); o bien para utilizarse como mascotas, como las tortugas de Florida (*Trachemys scripta*), o especies cinegéticas, como el arruí (*Ammotragus lervia*); o incluso por su valor estético, como el visón americano (*Neovison vison*).

En cuanto a las plantas foráneas, muchas se han introducido también por su valor estético. Las consecuencias de ello son hoy en día bien visibles, ya que las plantas ornamentales de nuestros jardines son la principal fuente de especies vegetales invasoras.

De modo paralelo a la invasiones intencionadas, otras se han producido de forma accidental. Entre las plantas, algunas se han extendido en nuestro entorno como «malas hierbas» o plagas agrícolas y forestales, sin que muchas veces sepamos a ciencia cierta cuál fue la vía de entrada ni la región de origen.

POR MAR Y POR TIERRA

Las invasiones biológicas están creciendo de forma exponencial en los últimos decenios. Y no hay visos de que esta curva de entrada y expansión de especies se esté estabilizando o alcanzando un máximo. Más bien al contrario: cuanto mayor es la actividad económica, mayor es la proporción de especies foráneas que nos encontramos en la naturaleza y mayor su área de distribución.

En el Mediterráneo, desde 2005 se establecen en promedio unas veinte especies exóticas de animales marinos cada año, de tal modo que, sumadas a las anteriores, hoy ya alcanzan el millar. Su vía principal de entrada es a través del canal de Suez. De hecho, hay quien considera que las aguas costeras del Mediterráneo oriental constituyen, tanto por su cambio en la biota como por el calentamiento del agua, una extensión del mar Rojo. Por ejemplo, en Túnez, más de la mitad del peso de las capturas corresponden a peces no nativos que poseen una menor calidad que los de las pesquerías de antaño. A la migración activa y flujo por corrientes de especies «lessepsianas» (adjetivo acuñado en honor al ingeniero Ferdinand de Lesseps, que diseñó y construyó el canal), hay que añadirle las que llegan incrustadas en

GETTY IMAGES/WABENO/ISTOCK

EN SÍNTESIS

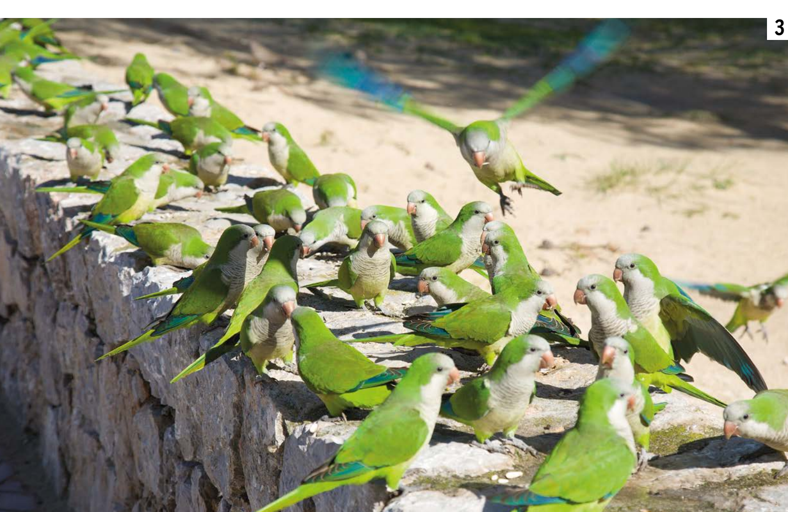
Las invasiones biológicas en la región mediterránea responden a su peculiar historia de comercio, asentamientos y colonialismo. Pero el aumento de los intercambios comerciales y culturales de los últimos decenios las ha exacerbado.

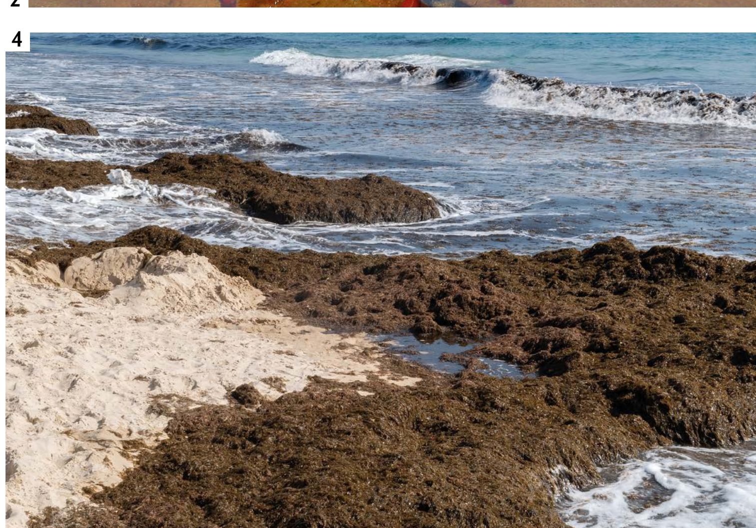
Las especies invasoras merman la biodiversidad local y alteran la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas autóctonos, lo que repercute de forma negativa en los servicios vitales que estos nos proporcionan.

Las estrategias para detenerlas pasan por un seguimiento y control coordinado entre países y por una mayor concienciación ciudadana sobre sus impactos.









LAS INVASIONES BIOLÓGICAS, como las del avispón asiático (*Vespa velutina*) (*1*), el cangrejo americano (*Procambarus clarkii*) (*2*), la cotorra argentina (*Myiopsitta monachus*) (*3*) y el alga asiática *Rugulopterix okamurae* (*4*), están ocasionando impactos tanto ecológicos como socioeconómicos.

GETTY IMAGES/ALBERTONOVO/ISTOCK (*avispón*); HECTOR GARRIDO, EBD-CSIC (*cangrejo*); GETTY IMAGES/TAMARA_KULIKOVA/ISTOCK (*cotorras*); GETTY IMAGES/ALGEFOTO/ISTOCK (*alga asiática*)

las superficies o inmersas en las aguas de lastre de los barcos procedentes de los océanos Índico y Pacífico. En las costas del Mediterráneo occidental, en cambio, gana en importancia la introducción de especies procedentes de la acuicultura.

Respecto a los ecosistemas terrestres mediterráneos, no existe un compendio con el número de especies exóticas que se han establecido en ellos. De plantas, debe de haber más de mil; de vertebrados, alrededor de quinientos, la mayoría pájaros; de artrópodos, unos centenares. Destaca la escasa coincidencia de especies entre países. Por ejemplo, España, Italia, Grecia y Chipre solo comparten 33 especies vegetales foráneas. Esta baja similitud en la flora exótica entre países puede explicarse por sus diferencias históricas y geográficas, sobre todo debido a su variable expansión colonial y a los distintos flujos comerciales en los que estos países han participado a lo largo de los siglos.

IMPACTOS ECOLÓGICOS Y SOCIOECONÓMICOS

Hasta hace pocas décadas, la introducción de especies se percibía con cierta fascinación, como un exotismo que enriquecía la flora y la fauna locales. Incluso en espacios protegidos se introdujeron especies en pro de la conservación, para aumentar la diversidad, para rellenar supuestos nichos ecológicos vacíos o para restaurar zonas degradadas. Sin embargo, en la actualidad existe un gran consenso científico de que las especies invasoras ocasionan efectos negativos no solo ambientales, sino también socioeconómicos.

Los impactos ambientales más frecuentes de las invasiones se relacionan con el desplazamiento que provocan de las especies nativas, con la consiguiente pérdida de la biodiversidad. La dominancia de las especies invasoras modifica la composición de las especies de la comunidad invadida, que se ven mermadas al tener que competir con ellas por los recursos vitales, como el espacio y los nutrientes. Además, las especies foráneas pueden ser depredadoras voraces o actuar como parásitos de las especies autóctonas. Y, por último, pueden producir cambios en el hábitat que, a través de un efecto en cascada, alteran por completo la estructura de las redes tróficas y el funcionamiento de los ecosistemas. Por ejemplo, las plantas invasoras modifican una serie de propiedades del suelo, como el *p*H, la materia orgánica, la cantidad de nutrientes, la humedad y la actividad enzimática, lo cual perjudica a la biota nativa adaptada a unas condiciones ambientales y recursos determinados.

Las repercusiones negativas son mayores cuanto más diferente es la especie invasora de las nativas con las que se encuentra. Esto es así por varios motivos: las especies exóticas carecen de enemigos naturales que les puedan frenar los pies y son generalmente más competitivas que las especies nativas. Además, estas se muestran especialmente vulnerables ante el comportamiento agresivo de especies con las que no han coexistido a lo largo de su evolución. Tal es el caso de muchos peces invasores de agua dulce que depredan a peces nativos, los cuales no saben cómo defenderse.

Pero las especies invasoras no se limitan a alterar la biodiversidad y los hábitats. También tienen repercusiones socioeconómicas que despiertan una gran preocupación. Según la última valoración económica, los costes para reparar los daños causados por las principales especies invasoras en Europa y para controlar su expansión ascienden a 20 billones de euros al año. Las invasiones ocasionan pérdidas considerables en el sector agrícola y forestal. En la cuenca mediterránea se han descrito más de 100 patógenos exóticos, en su mayoría hongos, que afectan a los cultivos y los arbolados. Muy a menudo estos patógenos pasan inadvertidos durante largo tiempo. Desgraciadamente, cuando son detectados ya han causado muchos daños y es demasiado tarde para erradicarlos.

Lo mismo ocurre con numerosos insectos invasores. El avispón asiático (*Vespa velutina*) llegó al sur de Francia en 2004. A pesar de que se alertó de su capacidad de expansión a través de los Pirineos, en menos de diez años ha alcanzado toda la cornisa norte de España y el archipiélago balear. Este avispón devorador de la abeja de la miel (*Apis mellifera*) causa mucha alarma social por el impacto que puede llegar a tener en el sector apícola. Además, sus picaduras en humanos son muy dolorosas. Sus colmenas son muy voluminosas y pueden alcanzar casi un metro de alto y medio de ancho. Aun así, no disponemos de una red de alerta eficaz para hacer un seguimiento de su expansión y será imposible detener al avispón, especialmente en zonas arboladas densas.

Pero quizás las invasiones biológicas más inquietantes son aquellas que favorecen la propagación de microorganismos que afectan a la salud pública. En muchos casos, los impactos dependen de interacciones bióticas complejas. No se ciñen al efecto directo de una especie exótica en las personas, sino que el efecto puede ser indirecto, a través de animales exóticos que actúan como reservorio o vectores de patógenos o parásitos causantes de enfermedades. En Europa existen al menos siete mosquitos exóticos que pueden transmitir virus patógenos. En los últimos 15 años, el mosquito tigre (*Aedes albopictus*) ha sido el vector de varios brotes de fiebre de chikungunya y dengue en Italia, Francia y Croacia, iniciados por enfermos que regresaban de países donde estas enfermedades son endémicas.

La salud humana también puede verse afectada, de forma directa, por otro tipo de organismos microscópicos invasores. En las aguas continentales y marinas nos encontramos con crecimientos masivos de algas microscópicas exóticas, como cianobacterias (*Chrysosporum ovalisporum*), dinoflagelados (*Ostreopsis cf. ovata*) y diatomeas (*Coscinodiscus wailessi*) que producen toxinas nocivas. El contacto con el agua contaminada puede provocar rinitis, dermatitis, conjuntivitis y fiebre, además de intoxicaciones por ingestión del marisco que filtra estas aguas.

Incluso el sector turístico puede verse afectado por las invasiones de especies. El verano de 2020 vimos con estupor cómo el alga asiática *Rugulopterix okamurae* se propagaba a un ritmo inusitado en las costas andaluzas, lo que lastró las capturas de pesca e impidió disfrutar de las playas.

El conocimiento de estos impactos se contrapone con el hecho de que muchas especies exóticas se consideren emblemáticas y se continúen utilizando como reclamo en folletos turísticos e incluso en espacios protegidos. Es más, al igual que ocurre con el negacionismo del cambio climático, algunas voces propugnan aceptar las invasiones biológicas como un fenómeno natural al que debemos adaptarnos. Sin duda, desde hace decenios nos estamos viendo forzados a adaptarnos a todos los componentes del cambio global. Pero esa capacidad de adaptación no es infinita. Debemos tener presente que la homogenización biótica producida por las invasiones biológicas está empobreciendo el patrimonio natural del Mediterráneo. Por tanto, si queremos conservar la biodiversidad, necesitamos gestionar también las invasiones biológicas.

ESFUERZO COORDINADO

Hay muchos paralelismos entre las invasiones biológicas y las epidemias. La Organización Mundial de la Salud recomienda la prevención y la detección precoz de las invasiones para afrontar la COVID-19 o cualquier otra epidemia. El Convenio de la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas hace estas mismas recomendaciones. Un paso necesario para seguirlas consiste en implementar sistemas de alerta que trabajen de forma coordinada entre países. La Organización Europea y Mediterránea para la Protección de Plantas (EPPO) proporciona análisis de riesgo y listas de especies para priorizar su control. El Programa de Seguimiento Integrado para el mar Mediterráneo (IMAP) también trabaja en diseñar acciones transnacionales de gestión de especies exóticas marinas. De este modo, los países mediterráneos miembros de la UE deben seguir la regulación sobre especies invasoras desplegada en 2014, que prohíbe, entre otras cosas, la tenencia, el comercio, la cría y la producción de una lista de especies, todavía escueta, que ocasionan impactos en la biodiversidad. No obstante, de poco sirven los grandes acuerdos internacionales y las leyes si no van acompañados de un esfuerzo de divulgación que dé a conocer a la población la problemática, así como las formas de prevenirla y mitigarla. Al igual que ocurre con las epidemias, resulta fundamental una mayor concienciación ciudadana sobre las invasiones biológicas para poder mantenerlas a raya. IyC

PARA SABER MÁS

A review of impact assessment protocols of non-native plants. Montserrat Vilà et al. en *Biological Invasions*, vol. 21, págs. 709-723, marzo de 2019.
Scientists' warning on invasive alien species. Petr Pyšek et al. en *Biological Reviews*, vol. 95, págs. 1511-1534, diciembre de 2020.
High and rising economic costs of biological invasions worldwide. Christophe Diagne et al. en *Nature*, vol. 592, págs. 571-576, marzo de 2021.
Viewing emerging human infectious epidemics through the lens of invasion biology. Montserrat Vilà et al en *BioScience*, vol. 71, págs. 722-740, julio de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

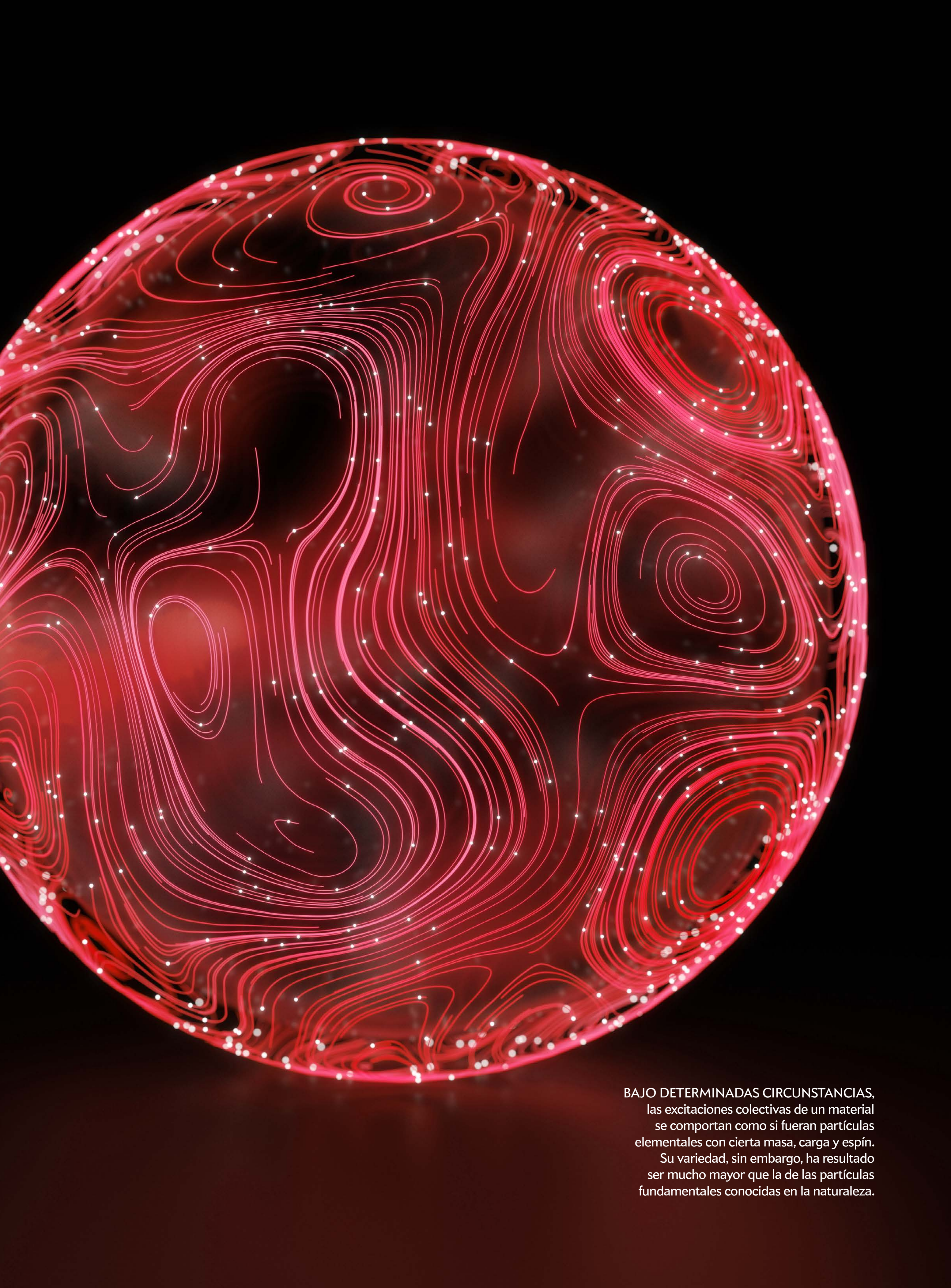
Especies invasoras. Robert Barbault y Anne Teyssèdre en Colección *Temas* de *IyC*, n.º 61, 2010.
Amigo de las invasoras. Brendan Borrell en *IyC*, abril de 2011.
Gestión de plantas invasoras en España. Montserrat Vilà, Jara Andreu y Joan Pino en *IyC*, marzo de 2013.

MATERIALES

Los muchos universos de la materia condensada

La idea de partícula no se limita a los constituyentes elementales del universo. En los últimos años, un «zoo» de nuevas cuasipartículas ha revolucionado la física de materiales

Ramón Aguado



BAJO DETERMINADAS CIRCUNSTANCIAS, las excitaciones colectivas de un material se comportan como si fueran partículas elementales con cierta masa, carga y espín. Su variedad, sin embargo, ha resultado ser mucho mayor que la de las partículas fundamentales conocidas en la naturaleza.

Ramón Aguado es físico teórico de la materia condensada e investiga en el Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC, en Madrid. Su trabajo se centra en el estudio de la superconductividad topológica y las cuasipartículas de Majorana.



A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX, UN PEQUEÑO LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD DE LEIDEN era conocido como «el lugar más frío de la Tierra». Aquel centro de criogenia desempeñaría un papel clave en el desarrollo de la física moderna después de que, en 1908, Heike Kamerlingh Onnes consiguiese licuar helio a 4,2 kelvin, o −268,8 grados Celsius. A partir de ese momento, la flor y nata de la física mundial comenzó a visitar el laboratorio, ya que allí se había logrado algo extraordinario: enfriar un material hasta alcanzar una temperatura muy cercana al cero absoluto (unos −273 grados Celsius). En efecto, la temperatura más baja jamás alcanzada en el planeta.

Tales temperaturas permitían plantearse experimentos hasta entonces inimaginables y abordar algunas preguntas fundamentales de la época. ¿Cómo conducía la electricidad un metal a temperaturas ultrabajas? ¿Cómo variaba la resistencia eléctrica en función de la temperatura? Motivado por estas cuestiones, Kamerlingh Onnes investigó el comportamiento de la corriente eléctrica a través de anillos de mercurio enfriados con helio líquido, y en 1911 descubrió algo totalmente inesperado: a 4,2 kelvin, la resistencia eléctrica del mercurio desaparecía por completo. Kamerlingh Onnes también demostró que, a temperaturas cercanas al cero absoluto, otros elementos y aleaciones presentaban el mismo fenómeno prodigioso, el cual bautizó como superconductividad. Por aquellos trabajos, Kamerlingh Onnes acabaría recibiendo el Nobel de física en 1913. Sin embargo, habrían de pasar muchos años antes de que la superconductividad pudiese entenderse desde un punto de vista teórico.

El camino que llevó a entender la superconductividad y otras propiedades exóticas de la materia, como la superfluidez, ilustra uno de los grandes cambios de paradigma que han tenido lugar en la física del siglo XX. Dicho cambio ha supuesto pasar de una visión exclusivamente reduccionista y centrada en la física de partículas como única teoría fundamental, a otra que reclama el mismo papel esencial para los fenómenos emergentes y el comportamiento colectivo de los sistemas formados por un gran número de constituyentes. No en vano, los mismos conceptos teóricos que emplean los físicos de altas energías para describir las partículas elementales, como el fotón, el electrón o el bosón de Higgs, se usan hoy en física de materiales, donde la variedad de partículas emergentes conocidas ya supera a la de partículas elementales en el modelo estándar. En los últimos años, estas nuevas partículas y los correspondientes «universos» a los que dan lugar (universos que «viven» en el seno de materiales como el grafeno, los superconductores o los aislantes topológicos) han revolucionado nuestra forma de entender las propiedades de la materia compleja y han dado lugar a avances y aplicaciones impensables hasta hace muy poco.

EL NACIMIENTO DE UNA CIENCIA

En sus primeros experimentos de 1911, Kamerlingh Onnes ya observó que, al enfriarse, el helio-4 líquido se expandía en vez de contraerse. Estudios posteriores demostraron que tanto la densidad como el calor específico del helio presentaban un máximo muy pronunciado en torno a los 2,2 kelvin. Dicha temperatura se denominó «punto lambda» y su existencia generó un gran debate debido a su posible interpretación como transición de fase; es decir, un cambio abrupto en las propiedades del

EN SÍNTESIS

Un material es un sistema físico compuesto por cientos de miles de trillones de partículas. Eso hace imposible entender propiedades como la superconductividad o la superfluidez a partir de una descripción puramente microscópica.

Una herramienta clave para estudiar tales fenómenos es la idea de cuasipartícula: excitaciones colectivas de múltiples átomos o electrones que, sin embargo, obedecen ecuaciones idénticas a las de una partícula puntual de cierto tipo.

En los últimos años se han comenzado a investigar varios tipos de cuasipartículas que carecen de análogo en el modelo estándar. Esta sorprendente riqueza ha ampliado de manera insospechada los horizontes de la física de materiales.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/SHULZ/ISTOCK

PIONERO DE UNA NUEVA CIENCIA: En los años treinta del siglo pasado, el físico soviético Lev Landáu analizó varios fenómenos en física de materiales usando técnicas propias de la física de partículas. Gracias a ello logró enormes avances en el estudio de la superfluidez, la superconductividad, las transiciones de fase y otros fenómenos emergentes en sistemas compuestos por un gran número de constituyentes.

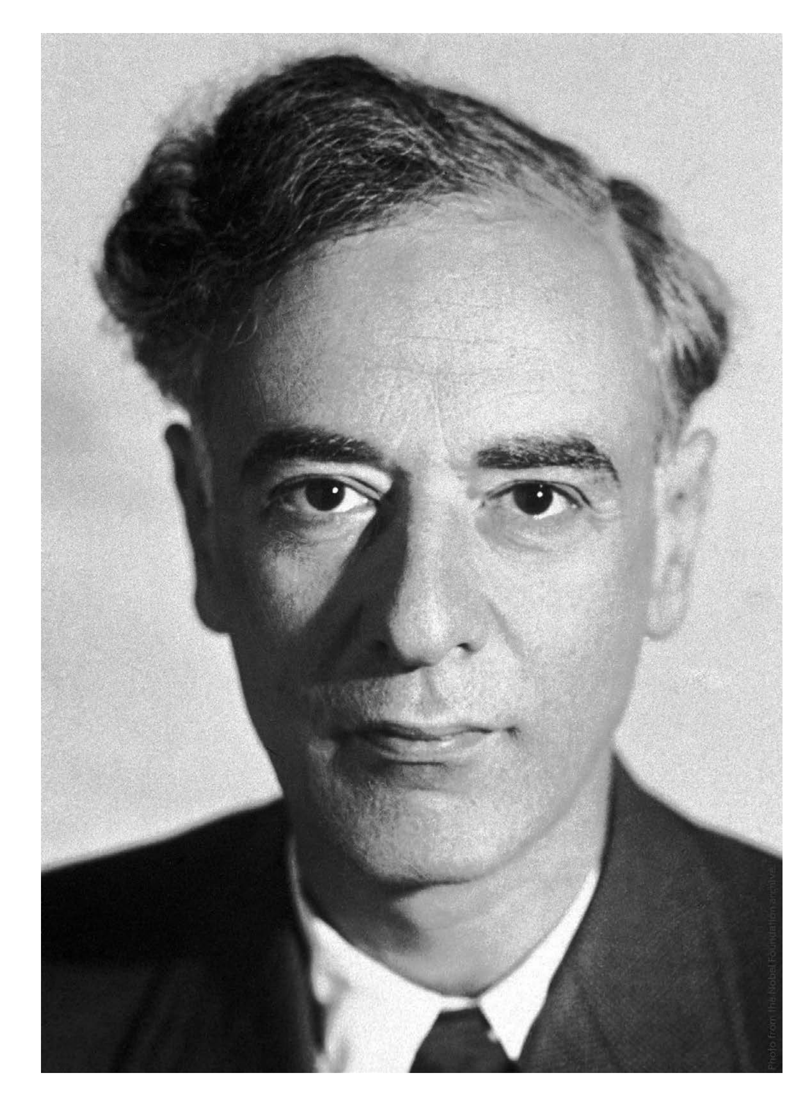


Photo from the Nobel Foundation archive

helio. La fase de menor temperatura, por debajo 2,2 kelvin, fue bautizada como helio II, mientras que la correspondiente a temperaturas mayores recibió el nombre de helio I.

Más de dos décadas después, en 1937, el físico soviético Piotr Kapitsa demostró en Moscú que, por debajo del punto lambda, el helio se comportaba como un líquido con ausencia total de viscosidad. En particular, podía fluir sin rozamiento hasta el punto de subir por las paredes de un recipiente y acabar derramándose. Kapitsa denominó «estado superfluido» a esa nueva fase hasta entonces desconocida, cuyo estudio le valdría el premio Nobel de física de 1978. (John Allen y Don Misener, dos discípulos de Kapitsa en Cambridge, habían demostrado el mismo efecto en 1937, aunque no recibieron el Nobel.)

Curiosamente, fueron necesarias muchas dosis de diplomacia y alta política para llegar a la comprensión del mecanismo físico que daba lugar a la superfluidez. Kapitsa tuvo muy claro desde el principio que la persona adecuada para entender tan insólito fenómeno era su amigo «Dau», apelativo cariñoso con el que muchos conocían a Lev Landáu, una de las mentes más brillantes de toda la historia de la física. Sin embargo, existía un obstáculo que evitaba que Landáu se pusiera manos a la obra: tras la acusación infundada por parte de un antiguo alumno de ser un espía alemán, Landáu había sido investigado por el KGB, arrestado y enviado a prisión en 1938.

Kapitsa salvó a Landáu. Escribió al primer ministro Viacheslav Mólotov diciéndole que acababa de hacer el descubrimiento más desconcertante en el campo de la física moderna y que el único teórico que podría explicarlo sería Landáu. Eso logró que, tras un año de encarcelamiento, Landáu fuera puesto en libertad condicional. En poco tiempo, explicó la superfluidez del helio en términos de ciertas excitaciones elementales sobre el estado de mínima energía: los «fonones» y los «rotones».

Los fonones, que habían sido descritos poco antes por su colaborador Ígor Tamm, son excitaciones cuánticas originadas por las vibraciones de los átomos de un material; es decir, obedecen a un fenómeno análogo en última instancia a la propagación de ondas sonoras (de ahí su nombre). Sin embargo, Landáu argumentó que, para explicar la superfluidez, era necesario incluir un nuevo tipo de excitaciones. Estas últimas, a las que denominó rotones, solo aparecían por encima de una energía umbral.

Aunque en ambos casos se trata de excitaciones colectivas (es decir, debidas al comportamiento coordinado de múltiples átomos), una aspecto clave era que tanto fonones como rotones podían describirse mediante ecuaciones formalmente análogas a las de una sola partícula. En el caso de los fonones se trataba de partículas sin masa, mientras que los rotones se comportaban como si fueran partículas masivas. Tales ideas sobre «partículas efectivas» no eran nuevas. En 1933, Landáu había introducido esos conceptos en su teoría del «polarón», un estado formado por un electrón y un campo de deformaciones generado por los fonones que el propio electrón genera al desplazarse a través de la red cristalina. Esta deformación se liga al electrón que la ha creado y se desplaza junto a él a través de la red, lo que equivale a modificar el valor de su masa.

En 1962 Landáu recibió el premio Nobel de física «por sus teorías pioneras en materia condensada, en especial la del helio líquido». Ya en esa cita, el comité reconocía a Landáu como uno de los padres de un nuevo campo de la física: el de la materia condensada. Este nuevo término se abrió con fuerza desde principios de los años sesenta, cuando se hizo evidente que el nombre «física del estado sólido», usado hasta entonces, se quedaba obsoleto para describir nuevos estados agregados de la materia, tanto sólidos como líquidos, formados por múl-

tiples constituyentes (átomos, electrones...) que interaccionan fuertemente entre sí.

UNA NUEVA NOCIÓN DE PARTÍCULA

La superconductividad y la superfluidez fueron dos de los grandes paradigmas experimentales que impulsaron este nuevo campo. Con el tiempo, las primeras ideas sobre excitaciones y partículas efectivas culminarían en uno de los grandes pilares conceptuales sobre los que hoy descansa la física de la materia condensada: la noción de cuasipartícula. Con este nombre se designa a las excitaciones de un material que, aunque se deban al comportamiento colectivo de múltiples átomos o electrones, obedecen ecuaciones idénticas a las que definen una partícula puntual de cierto tipo.

Tal y como la entendemos hoy, la idea de cuasipartícula surgió también al estudiar el comportamiento del helio, aunque en este caso el del helio-3, el isótopo formado por dos protones y un neutrón. A diferencia de lo que ocurre con los electrones en un metal, los átomos de helio-3 presentan fuertes interacciones mutuas. Para describirlo, Landáu propuso que este sistema podía entenderse como el resultado de una evolución desde un estado sin interacciones hasta uno en el que los constituyentes interaccionan fuertemente entre sí. En un alarde de intuición física, el físico soviético razonó que, a través de dicha evolución, los números cuánticos de los átomos (como, por ejemplo, el espín del núcleo) se conservaban, pero que ciertas cantidades que caracterizan su dinámica, como la masa, se «renormalizaban»; es decir, adquirían un nuevo valor efectivo debido a las interacciones. Así pues, en dicha descripción, estas cuasipartículas pueden entenderse como partículas libres, solo que caracterizadas por parámetros distintos.

Las cuasipartículas no son un mero constructo teórico, sino que pueden medirse experimentalmente a la escala de energía apropiada. En este sentido, una cuasipartícula tiene la misma entidad fundamental que una partícula

Junto al helio-3, otro de los líquidos cuánticos más estudiados es el sistema formado por electrones obligados a moverse en dos dimensiones por estar «emparedados» entre dos placas semiconductoras. En 1980, Klaus von Klitzing, quien más tarde recibiría por ello el premio Nobel, descubrió que, bajo un campo magnético intenso, dicho sistema exhibía una «resistencia de Hall» (el cociente entre el voltaje en una dirección y la corriente eléctrica en la dirección transversal) que estaba cuantizada en múltiplos enteros h/e^2, donde h es la constante de Planck y e denota la carga del electrón; es decir, constantes fundamentales de la naturaleza. Sorprendentemente, ese cociente presentaba una robustez inusual en casi cualquier tipo de muestra, con independencia del grado de desorden o de otros detalles microscópicos. Hoy, la cuantización de la resistencia de Hall tiene una precisión de más de una parte en mil millones y se usa para determinar la carga del electrón y la unidad de resistencia [*véase* «El efecto Hall cuántico», por Klaus von Klitzing; Investigación y Ciencia, mayo de 1986].

El efecto Hall cuántico presenta también una versión donde los saltos aparecen en fracciones de h/e^2, en vez de en múltiplos enteros. En ciertos casos, dicho fenómeno puede entenderse en términos de cuasipartículas con carga fraccionaria, las cuales cabe interpretar como estados ligados entre los electrones y las líneas de flujo magnético. Robert Laughlin, quien desarrolló esta teoría, recibió por ella el premio Nobel de 1998 junto con los investigadores que descubrieron experimentalmente el efecto Hall cuántico fraccionario, Daniel Tsui y Horst Störmer.

Hoy, el concepto de cuasipartícula como excitación emergente en un sistema colectivo se encuentra muy extendido y constituye una herramienta indispensable en física de la materia condensada. Una de sus grandes virtudes radica en que, en la práctica, es totalmente imposible formular una descripción microscópica de un sistema cuántico de muchas partículas, ya que eso implicaría combinar las interacciones de los 10^{23} átomos que típicamente forman un cristal, con sus correspondientes electrones, protones y neutrones. Sin embargo, una descripción basada en cuasipartículas es capaz de aislar las características más importantes del sistema y descartar el exceso de información, el cual solo complica el problema sin aportar física relevante.

Las cuasipartículas no son un mero constructo teórico, sino que tienen un profundo significado físico y pueden medirse experimentalmente sondeando el sistema a la escala de energía apropiada. En ese sentido, una cuasipartícula tiene la misma entidad fundamental que una partícula. Hoy, el número de especies en el «zoo» de las cuasipartículas es numeroso y sigue creciendo con nombres cada vez más exóticos, como holones, espinones, excitones, triones, levitones, neutralones o fractones, entre otros.

EMERGENCIA FRENTE A REDUCCIONISMO

Llegados aquí, conviene detenerse a apreciar la relevancia científica e incluso filosófica de estos avances. Laughlin cuenta cómo le gustaba retar a sus estudiantes más brillantes de Stanford proponiéndoles que derivasen la teoría de la superfluidez a partir de una descripción microscópica. Ninguno de ellos logró jamás acercarse lo más mínimo a una solución, y posiblemente no por falta de talento. A propósito, Laughlin les había planteado el problema desde una premisa errónea: el lenguaje correcto para entender la superfluidez no es una descripción microscópica, sino el de las cuasipartículas emergentes.

Laughlin usa esta anécdota para ilustrar el que en las últimas décadas ha sido su gran caballo de batalla: la contraposición entre una visión emergente de la naturaleza frente a la física reduccionista, o la idea de «teoría del todo». En su artículo «The theory of everything», publicado en el año 2000, escribía: «La tarea central de la física teórica de nuestro tiempo ya no es escribir las ecuaciones últimas, sino más bien catalogar y entender el comportamiento emergente en sus muchas formas, incluida potencialmente la misma vida. [...] [Estas ideas] son una llamada a todos aquellos que estamos preocupados por la

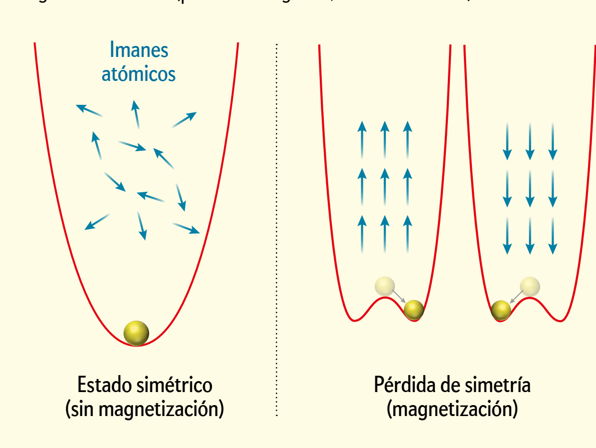
FENÓMENOS EMERGENTES

Simetrías y propiedades macroscópicas

Uno de los conceptos clave para entender la aparición de fenómenos emergentes en física de materiales es la idea de ruptura de simetría. En este lenguaje, una transición de fase (un cambio abrupto en las propiedades de un material, como la aparición de la magnetización o de la superconductividad cuando la temperatura alcanza un cierto valor crítico) equivale a una pérdida de simetría. Estos dos modelos sencillos ilustran la idea.

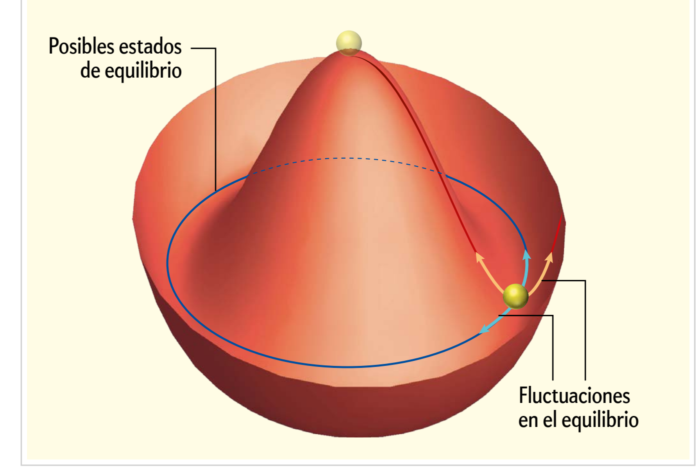
Magnetismo

Una bola que rueda por una curva con forma de valle (*izquierda*) alcanzará el equilibrio en el punto central. Sin embargo, si deformamos la curva elevando la base, aparecerán dos nuevos mínimos (*derecha*) y la bola habrá de asentarse en uno de ellos, por lo que la simetría inicial desaparecerá. En un material ferromagnético, estas dos situaciones describen, respectivamente, la fase sin magnetización (*flechas desordenadas*) y aquella en la que aparece una magnetización neta (positiva o negativa, *flechas alineadas*).



Superconductividad y mecanismo de Higgs

Otro modelo con importantes aplicaciones es el conocido como «potencial de sombrero mexicano». Este se obtiene al hacer girar la curva anterior sobre su eje de simetría. Ahora tendremos un número infinito de mínimos (*circunferencia*) y, una vez más, la simetría inicial se perderá cuando el sistema se asiente en uno de ellos. Este modelo desempaña un papel clave en superconductividad y también en el mecanismo de Brout-Englert-Higgs que explica por qué las partículas elementales tienen masa.



salud de las ciencias físicas a afrontar la verdad de que, en muchos casos, el ideal reduccionista ha llegado a sus límites como principio rector».

Así pues, el célebre modelo estándar de la física de partículas, el exclusivo club formado por un reducido número de partículas elementales y sus interacciones, no puede ser entendido como un conjunto de ladrillos básicos que describen la naturaleza en su totalidad (tampoco aunque supiéramos cómo incorporar la gravedad al resto de las interacciones). O, por emplear un símil más sencillo, todos entendemos la gigantesca distancia que media entre conocer las notas musicales o los colores básicos y componer o pintar una obra maestra. La visión emergente de la naturaleza se opone, por tanto, a la visión reduccionista. Esta última, demasiado focalizada en la física de partículas como teoría del todo, todavía perdura entre muchos físicos y es objeto de numerosos artículos de divulgación centrados en física de altas energías.

El concepto de emergencia, uno de los grandes avances intelectuales de las últimas décadas, nace de un brillante artículo publicado en 1972 por el también premio nóbel Philip Anderson. Titulado «More is different», en él escribía: «En cada nivel de complejidad aparecen propiedades completamente nuevas, y la comprensión de estos nuevos comportamientos requiere una investigación que considero tan fundamental en su naturaleza como cualquier otra». La clave reside en entender que, en la práctica, las propiedades de un sistema compuesto —ya se trate de un material o de una proteína— no pueden deducirse de las propiedades de las piezas que lo componen (átomos, aminoácidos), sino que emergen como consecuencia de la organización espontánea de esos constituyentes. Dichas propiedades nacen de la complejidad del conjunto, y no pueden predecirse analizando los constituyentes por separado. El todo es mucho más que la simple suma de las partes.

La emergencia es un paradigma que va mucho más allá de la física o de las ciencias naturales. Es obvio que en otras disciplinas, como la sociología o la economía, millones de interacciones y eventos dan lugar a comportamientos colectivos y fenómenos que no pueden ser siquiera intuidos a partir de los comportamientos individuales. Estas ideas han sido profusamente estudiadas y divulgadas en tales ámbitos.

ORDEN Y SIMETRÍA

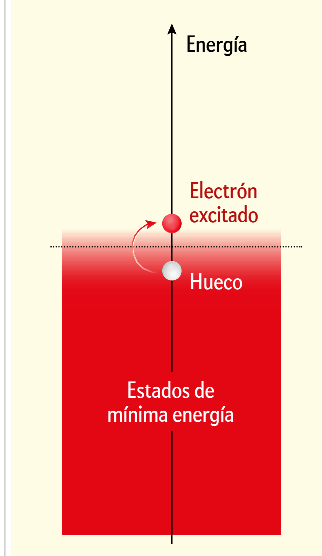
Aparte de las cuasipartículas, el concepto de emergencia se asienta en otro gran paradigma: la idea de ruptura de simetría y la generación de parámetros de orden durante las transiciones de fase. En este lenguaje, una transición de fase, un cambio abrupto en las propiedades de un material, equivale a una pérdida de simetría y al hecho de que siempre existe una cantidad (el parámetro de orden) que deja de valer cero y pasa a adoptar un valor no nulo.

Pensemos en cómo se genera el magnetismo en un material. A nivel microscópico, podemos considerar cada átomo como un pequeño imán. Cuando la temperatura es lo suficientemente elevada, el desorden térmico hará que cada uno de esos imanes diminutos apunte en una dirección aleatoria, por lo que la magnetización total de la muestra será nula. Sin embargo, a medida que bajamos la temperatura, el campo magnético de cada átomo tenderá a alinearse con el de sus vecinos, por lo que llegará un momento en el

CUASIPARTÍCULAS

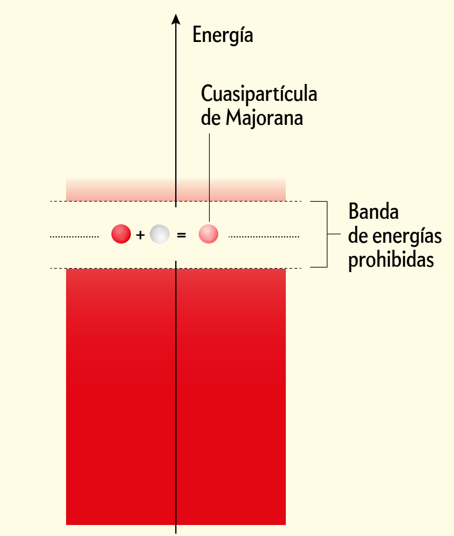
Antipartículas en metales y «neutrinos» en superconductores topológicos

En un material, las excitaciones sobre el estado de mínima energía obedecen al comportamiento conjunto de múltiples átomos o electrones. Sin embargo, en casi todos los casos de interés, dichas excitaciones colectivas se comportan de manera formalmente idéntica a partículas elementales de cierto tipo con determinada masa y carga. Este concepto, denominado «cuasipartícula», permite explicar las propiedades de numerosos materiales.



Metales

Uno de los ejemplos más sencillos de cuasipartícula aparece al considerar las excitaciones en un metal. Excitar un electrón por encima del estado de mínima energía deja un «hueco» en dicha banda energética que, formalmente, se comporta de manera idéntica a como lo haría un electrón de carga positiva (es decir, un antielectrón).



Superconductores topológicos

En estos materiales es posible crear una excitación con energía cero que se comporta como «mitad electrón» y «mitad hueco». Aunque aún se debate su confirmación experimental, estas cuasipartículas serían «fermiones de Majorana», un tipo de partícula idéntica a su antipartícula que ha sido propuesta para describir los neutrinos.

que comenzará a aparecer un orden en la muestra. A partir de ese punto crítico, el promedio de todos los momentos magnéticos ya no será cero y el sistema habrá experimentado una transición de fase en la que sus propiedades macroscópicas (emergentes) se habrán modificado. Habrá pasado de tener una magnetización total nula a temperaturas altas a una distinta de cero a temperaturas bajas. En este caso, el parámetro de orden es la magnetización de la muestra.

De manera simultánea a la aparición de un parámetro de orden distinto de cero, el sistema ha perdido una simetría: la invariancia bajo rotaciones. En la fase sin magnetización, la muestra presenta el mismo aspecto con independencia de la dirección desde la que miremos. Sin embargo, cuando surge la magnetización (es decir, un polo norte y sur magnéticos), esa simetría rotacional se pierde.

Existe una manera muy útil de visualizar esta ruptura de simetría. Pensemos en una bola a la que dejamos rodar libremente por una curva con forma de valle (*véase el recuadro* «Simetrías y propiedades macroscópicas»). Si la curva es simétrica a derecha e izquierda, la bola alcanzará de manera espontánea el equilibrio en el punto central, al que asignaremos la coordenada $x = 0$. En tal caso, tanto la curva como la posición de equilibrio de la bola son simétricas. Sin embargo, si deformamos la curva elevando ligeramente dicho punto central, aparecerán dos nuevos puntos de equilibrio, uno a la derecha y otro a la izquierda. Y ante la mínima perturbación, la bola caerá a uno de ellos. La curva sigue siendo simétrica, pero la posición de la bola ya no.

En una transición magnética, la situación de alta temperatura corresponde a aquella en que la curva presenta un solo mínimo simétrico en $x = 0$. Enfriar el material por debajo de la temperatura crítica equivale a deformar la curva, con la aparición de los dos nuevos mínimos. El sistema sin magnetización es análogo a la situación en que la bola alcanza el equilibrio en $x = 0$, mientras que la aparición de una magnetización neta (positiva o negativa) corresponde a la bola situada en uno de los dos mínimos (el derecho o el izquierdo). En este caso, el parámetro de orden es la coordenada x que indica la posición de equilibrio de la bola: dicho parámetro vale $x = 0$ en la situación simétrica, y $x \neq 0$ cuando la simetría se pierde. A pesar de su sencillez, este modelo describe un gran número de transiciones de fase en sistemas físicos muy distintos; una idea que también fue propuesta originalmente por Landáu.

Es en el mundo cuántico donde estos conceptos alcanzan toda su profundidad y fortaleza. Si consideramos las transiciones de fase en superconductores y superfluidos, en ambos casos podremos entenderlas como una ruptura de simetría en la que un número macroscópico de partículas acaban ocupando el estado de menor energía del sistema, en cuyo caso decimos que forman un «condensado». En estos condensados aparece un parámetro de orden distinto de cero, el cual se escribe en términos de una función de onda macroscópica.

En 1950, Landáu y su alumno de doctorado Vitali Ginzburg postularon una teoría de este tipo para la superconductividad, aunque argumentaron erróneamente que el parámetro de orden correspondía a la densidad de electrones. Siete años más tarde, John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer, conocidos desde entonces por sus iniciales (BCS), acabaron dando con la explicación correcta. A partir de una descripción puramente

cuántica, entendieron que, aunque un metal esté compuesto por electrones, el condensado que tiene lugar en un superconductor está formado en realidad por «pares de Cooper»: parejas de electrones que vencen su tendencia natural a la repulsión electrostática debido a una interacción efectiva mediada por fonones. Dos años más tarde, Lev Gorkov, por entonces en la Academia de las Ciencias de la Unión Soviética, concilió ambas formulaciones y demostró que la teoría general de Landáu y Ginzburg podía derivarse rigurosamente a partir de la teoría BCS al tener en cuenta que el parámetro de orden correcto era la densidad de pares de Cooper, en vez de la densidad de electrones. En 1972, Bardeen, Cooper y Schrieffer vieron reconocido su trabajo con el premio Nobel.

BOSONES EN SUPERCONDUCTORES

En todo caso, el debate entre «emergentistas» y «reduccionistas» es en gran medida un debate falso, ya que es posible establecer numerosas analogías entre la física de la materia condensada y la física de altas energías. Una vez que hemos determinado que, en materia condensada, la descripción debe hacerse en términos de cuasipartículas y parámetros de orden, el paralelismo con la física de partículas se hace manifiesto.

A modo de ejemplo, un modelo con importantes aplicaciones tanto en física de partículas como en materia condensada es el conocido como «potencial de sombrero mexicano». Consideremos de nuevo la curva anterior con dos mínimos, pero ahora hagámosla girar sobre su eje de simetría. La superficie resultante tendrá la forma característica de un sombrero mexicano (*véase el recuadro* «Simetrías y propiedades macroscópicas»). Ahora tendremos un número infinito de mínimos (o de «vacíos», en el lenguaje de la física de partículas) y, una vez más, la simetría inicial se perderá toda vez que nuestro sistema se asiente en uno de ellos.

Sin embargo, en este caso ocurre algo especial: todos los estados de equilibrio tienen la misma energía, por lo que físicamente está permitido que haya fluctuaciones entre ellos. En otras palabras, la bola puede fluctuar libremente y sin gasto energético a lo largo de la circunferencia que conecta todos esos mínimos. En física de altas energías, tales fluctuaciones quedan descritas por los llamados «bosones sin masa de Goldstone», en honor al físico teórico Jeffrey Goldstone, quien los describió en 1961. Este mecanismo desempaña un papel clave en el modelo estándar de la física de partículas y, en concreto, en la explicación de por qué las partículas elementales tienen masa.

En el caso de un superconductor, el mecanismo de generación de masa se puede entender a través del acoplamiento de estas fluctuaciones con el campo electromagnético, que hace que los bosones de Goldstone no sean estables. Fue Anderson quien, en 1963, estudió por primera vez este tipo de acoplamiento y demostró que, debido al efecto ejercido por los fotones del campo electromagnético, esos modos sin masa se convertían en masivos. Este mecanismo es, en esencia, el mismo que genera la masa de las partículas del modelo estándar y el que implica la existencia del bosón (masivo) de Higgs. De hecho, esta comparación ya aparece en el artículo original de Peter Higgs de 1964, donde el físico británico escribe: «Este fenómeno no es más que el análogo relativista del fenómeno [...] descrito por Anderson».

Aparte de la superconductividad y las altas energías, existen otros muchos ejemplos de bosones de Golstone en física. En materia condensada podemos mencionar, por ejemplo, las ondas de espín («magnones») en sistemas magnéticos, los fonones acústicos en sólidos, y también los responsables de la superfluidez del helio-4. De hecho, los fonones acústicos del helio-4 fueron una de las primeras manifestaciones de bosones de Goldstone en física.

FERMIONES EN MATERIALES TOPOLÓGICOS

Las analogías entre la física de altas energías y la materia condensada no acaban con los modos de Goldstone y los bosones de Higgs. Un ejemplo especialmente importante en los últimos años ha sido el estudio de «fermiones de Dirac» en ciertos materiales. En términos sencillos, un fermión de Dirac es una partícula masiva de espín 1/2 que obedece la ecuación de Dirac; es decir, la generalización relativista de la ecuación de ondas de Schrödinger hallada por Paul Dirac en 1928.

La gran explosión de fermiones de Dirac en materia condensada ha venido de la mano de los materiales topológicos. Este nuevo tipo de materiales se caracterizan por ser aislantes en el interior pero conductores en la superficie, un exótico fenómeno íntimamente ligado a las propiedades matemáticas de la función de onda cuántica. Una característica fundamental de estos materiales es que las transiciones de fase no se deben al mecanismo de pérdida de simetría que hemos visto antes, sino que quedan descritas por ciertos «invariantes topológicos»: números enteros que solo pueden cambiar de manera discreta y que no dependen de los detalles microscópicos del sistema [*véase* «Un raudal de materiales topológicos», por Maia G. Vergniory y Barry Bradlyn; Investigación y Ciencia, septiembre de 2019].

En un material topológico, los estados conductores de la superficie pueden describirse formalmente como fermiones relativistas. Dicho de otra manera: todas las propiedades e interacciones microscópicas del material «conspiran» para que los electrones (que originalmente están gobernados por una ecuación no relativista) se comporten de manera efectiva como cuasipartículas regidas por la ecuación de Dirac. Es importante señalar que, aunque la ecuación de Dirac describa partículas relativistas, esto no quiere decir que los electrones del material se muevan a velocidades próximas a la de la luz. Sin embargo, si obedecen una ecuación formalmente idéntica a la de Dirac, en la que la velocidad de la luz queda reemplazada por una «velocidad de la luz efectiva» dada por las propiedades del material. La primera sustancia donde se identificó este comportamiento fue el grafeno, un «universo» donde esta «velocidad de la luz efectiva» es de unos 10^6 metros por segundo.

Estos materiales de Dirac pueden convertirse en topológicos de varias maneras. Por ejemplo, Charles Kane y Eugene Mele, de la Universidad de Pensilvania, demostraron en 2005 que ciertos materiales pueden comportarse como aislantes topológicos sin necesidad de aplicar campos magnéticos externos. La versión tridimensional de estos materiales sigue precisamente una ecuación de Dirac, y su investigación en otras sustancias, como el seleniuro de bismuto y el telururo de bismuto, constituye uno de los campos más activos de la investigación actual.

ANTIPARTÍCULAS EN METALES

Además de describir la dinámica relativista de partículas con espín 1/2, la ecuación de Dirac exhibe una segunda consecuencia de gran relevancia: la existencia de soluciones con energía negativa. Dirac concluyó que tales soluciones tenían un profundo significado físico y que definían un vacío, el «mar de Dirac», compuesto por infinitos estados de energía negativa. Las excitaciones de dicho vacío de energía negativa dejarían un «hueco», el cual que actuaría exactamente igual que un electrón (es decir, una partícula de energía positiva) pero con carga positiva.

A partir de tales ideas, Dirac predijo erróneamente que esas «antipartículas» serían los protones. Sin embargo, la gran diferencia entre la masa del electrón y la del protón le hizo cambiar rápidamente de idea y, en 1931, le llevó a postular la existencia del positrón, la antipartícula del electrón (en realidad, Dirac nunca usó el término *positrón*, sino *antielectrón*). Tan solo un año después, la partícula apareció en los experimentos con rayos cósmicos, lo que despejó todas las dudas sobre la existencia de la antimateria.

Las mismas nociones se aplican en materia condensada. Ya en 1926, Enrico Fermi había introducido conceptos muy similares en su teoría de los metales cuando propuso que una excitación sobre el estado colectivo de menor energía posible (el «mar de Fermi») dejaría tras de sí un estado vacío, o «hueco», el cual podía interpretarse como un electrón de carga positiva en el seno del metal. Desde entonces, esta teoría de electrones y huecos ha cosechado incontables éxitos a la hora de explicar las propiedades ópticas y electrónicas de metales y semiconductores.

NUEVAS PARTÍCULAS

Existen distintas variantes de la ecuación de Dirac. En el contexto de la física de partículas, el físico teórico alemán Hermann Weyl propuso en 1929 que, en el caso de partículas sin masa, la ecuación de Dirac admitía soluciones que describían partículas de espín 1/2 y con quiralidad opuesta; es decir, con su momento paralelo o antiparalelo al espín. Durante un tiempo se pensó que los neutrinos podrían ser estos «fermiones de Weyl», pero el descubrimiento a finales del siglo pasado de que estas partículas tienen masa invalidó la hipótesis. A pesar de su elegancia matemática, hoy sabemos que no existe ninguna partícula del modelo estándar que sea un fermión de Weyl. Sin embargo, a modo de cuasipartículas, estos estados sí aparecen en materia condensada.

Eso ocurre en los llamados semimetales de Weyl, los cuales dan lugar a fenómenos como la anomalía quiral, un desequilibrio en la quiralidad cuando se aplican un campo eléctrico y magnético paralelos. En física de altas energías, este tipo de anomalías se exploran en situaciones extremas, como el plasma de quarks y gluones, un estado exótico de la materia que solo puede generarse en gigantescos aceleradores de partículas, como el LHC del CERN. En materia condensada, sin embargo, esta anomalía puede observarse en laboratorios mucho más modestos estudiando la conductividad eléctrica frente al campo magnético en distintos materiales, como el arseniuro de tántalo. Por otro lado, los tratamientos modernos de la teoría del helio han demostrado que también este material contiene fases con fermiones de Weyl. Una vez más, se pone de manifiesto la versatilidad y la potencia de las descripciones de cuasipartícula en física de la materia condensada cuántica.

Otra variante más de la ecuación de Dirac fue propuesta en 1937 por el físico italiano Ettore Majorana. Su ecuación demostraba que era posible escribir una ecuación relativista para fermiones idénticos a su propia antipartícula (razón por la que tendrían que tener carga eléctrica nula). Majorana postuló que una de esas exóticas partículas podrían ser los neutrinos: una hipótesis que a día de hoy continúa abierta, pero que, a pesar de los grandes experimentos que se han diseñado para ponerla a prueba, sigue sin demostrar. En caso de confirmarse, la existencia de neutrinos de Majorana tendría grandes implicaciones en física de partículas, astrofísica y cosmología.

Hoy, gran parte de la investigación en partículas de Majorana se centra en superconductores. En estos materiales es posible generar superposiciones cuánticas electrón-hueco, conocidas como cuasipartículas de Bogoliubov. Estos modos describen excitaciones sobre el estado fundamental de la teoría BCS que hacen las veces de pares partícula-antipartícula en el superconductor. Aunque, en general, estas cuasipartículas tienen asociada una carga eléctrica y una energía, bajo ciertas condiciones es posible generarlas sin carga y sin coste energético, lo que las convertiría en cuasipartículas de Majorana. Los sistemas capaces de alojar estas excitaciones tan exóticas se conocen como superconductores topológicos, y constituyen la variante superconductora de los aislantes topológicos.

Aunque hasta hace apenas diez años se pensaba que sería prácticamente imposible que la superconductividad topológica existiese en la naturaleza, en la actualidad existen varias ideas para diseñar superconductores topológicos a partir de materiales ya conocidos, como los sistemas híbridos semiconductor-superconductor, los aislantes topológicos acoplados a superconductores, o las cadenas de átomos magnéticos depositados en superficies superconductoras. Con todo, y a pesar de los grandes avances que han tenido lugar en los últimos años, en la actualidad existe un debate sobre si ya contamos o no con una confirmación experimental definitiva de la presencia de cuasipartículas de Majorana en materia condensada.

Una de las grandes ventajas de las cuasipartículas de Majorana es su potencial en computación cuántica, ya que sería posible emplearlas para construir bits cuánticos deslocalizados en dos mitades. Esa deslocalización haría que el qubit fuese extremadamente robusto frente a perturbaciones de todo tipo, lo que se espera que dé lugar a una computación cuántica tolerante a fallos. Este enfoque difiere del usado en los ordenadores cuánticos actuales como los de Google o IBM, basados en superconductores estándar (no topológicos), si bien es una dirección que explora Microsoft. En caso de lograrlo, el avance supondría una auténtica revolución en el campo.

Es de esperar que, en los próximos años, la variedad de cuasipartículas que pueblan estos «universos emergentes» en materia condensada siga creciendo. Sus propiedades teóricas y sus aplicaciones marcarán un futuro en el que buena parte de este camino está aún por recorrer.

PARA SABER MÁS

More is different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. Philip Anderson en *Science*, vol. 177, págs. 393-396, agosto de 1972.

The theory of everything. Robert Laughlin y David Pines en *Proceedings of the Nacional Academy of Sciences*, vol. 97, págs. 28-31, enero de 2000.

The Universe in a Helium Droplet. Grigory Volovik. Clarendon Press, 2003.

A different universe: Reinventing physics from the bottom down. Robert Laughlin. Basic Books, 2006.

Majorana quasiparticles in condensed matter. Ramón Aguado en *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 40, págs. 523-593, octubre de 2017.

Majorana qubits for topological quantum computation. Ramón Aguado y Leo Kouwenhoven en *Physics Today*, vol. 73, págs. 44-50, junio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El expediente policial de Lev Landau. Gennady Gorelik en *IyC*, octubre de 1997.

De la superconductividad al bosón de Higgs. Miguel Á. Vázquez-Mozo en *IyC*, julio de 2014.

Aislantes topológicos. David Carpentier y Laurent Lévy en *IyC*, agosto de 2015.

La búsqueda de partículas de Majorana. Ramón Aguado en *IyC*, agosto de 2015.

por Marc Boada



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

La lámpara de lava

Un experimento sencillo permite ilustrar la dinámica de uno de los tipos menos conocidos de vulcanismo

Las erupciones volcánicas, muy presentes desde hace unas semanas en los medios, son fenómenos de gran interés científico que, por desgracia, interfieren destructivamente en la actividad humana. En ellas asistimos perplejos a una espectacular demostración de la energía geotérmica en su manifestación más evidente. Al hacerlo, es natural preguntarse sobre el origen del vulcanismo. Si consultamos cualquier libro de geología, descubriremos que las regiones volcánicas se encuentran situadas en puntos de especial actividad tectónica. Así, lo arcos volcánicos del Pacífico se hallan sobre zonas donde la corteza oceánica subduce bajo la continental. Por un lado, eso genera un rozamiento que provoca calor; por otro, induce una hidratación de las rocas que disminuye su temperatura de fusión, lo que facilita su ascenso hacia la superficie.

También se levantan grandes edificios volcánicos en las dorsales oceánicas, donde a través de largas suturas efluye nuevo basalto que contribuye a la expansión oceánica. Por último, existe asimismo un vulcanismo muy activo en el interior de los continentes. En este caso, la causa suele ser un adelgazamiento de la corteza continental debida a fenómenos asociados a grandes campos de fallas. En estas zonas, la descompresión de las rocas de la parte inferior de la corteza y la superior del manto, la astenosfera, facilita la segregación de gases que ascenderán hacia la superficie, arrastrando con ellos la lava.

Sea cual fuere el mecanismo, hace ya décadas que se observó que algunas estructuras volcánicas no respondían a ninguna de estas situaciones. Si miramos un mapamundi, comprobaremos que, en medio de los océanos, allí donde nada apunta a la existencia de un volcán, emergen una o varias islas formadas por enormes edificios volcánicos que se levantan miles de metros hasta la superficie. La explicación, hasta ahora no absolutamente comprobada, es que de las profundidades del manto terrestre, activados por el ca-

*** El experimento**

Construiremos dos modelos de lámpara de lava: uno similar a las comerciales y otro con mayor interés científico.

*** Materiales**

Frascos de vidrio
Latas de conservas
Velas
Aceite de girasol
Agua y etanol

Acuario pequeño
Calefactor de acuario
Termostato
Programador

*** Precio aproximado**

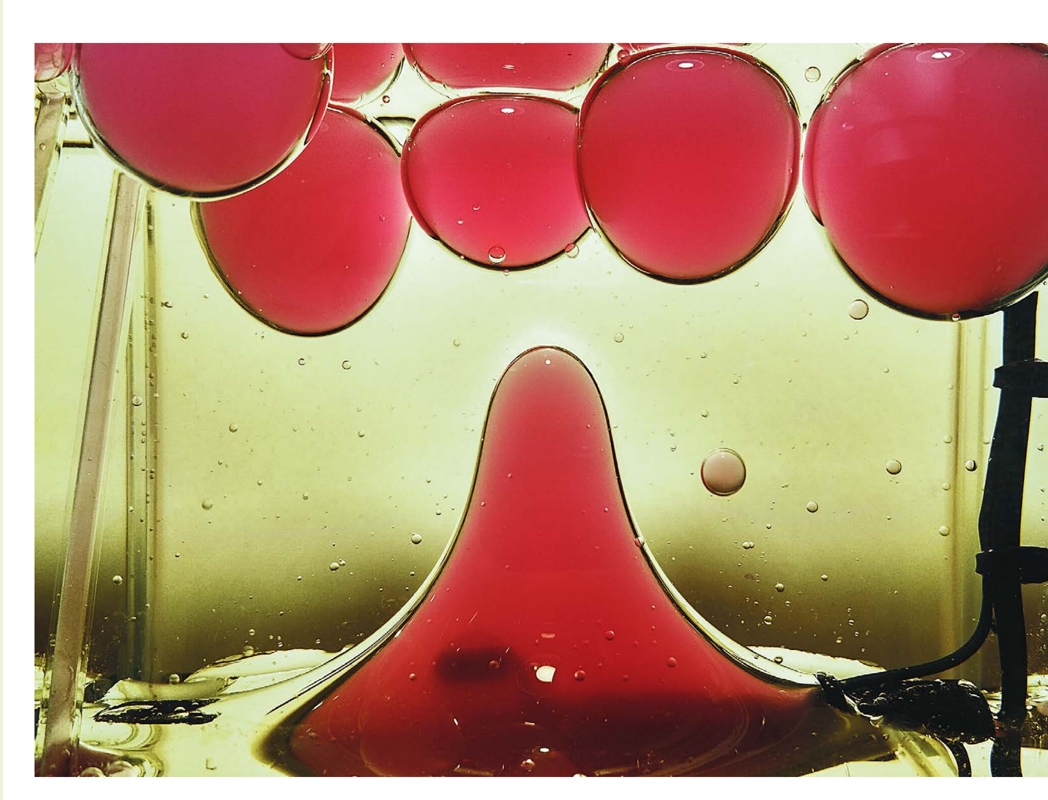
Decenas de euros

*** Tiempo**

En una tarde puede construirse el modelo básico. La experimentación modificando parámetros puede ocupar varios días.

*** Dificultad**

Baja



MARC BOADA FERRER

DOS LÍQUIDOS INMISCIBLES y con densidades muy próximas es casi todo lo que necesitamos para construir una lámpara de lava. El resultado es una bella práctica de dinámica de fluidos que recuerda a algunos de los fenómenos que originan el vulcanismo terrestre.

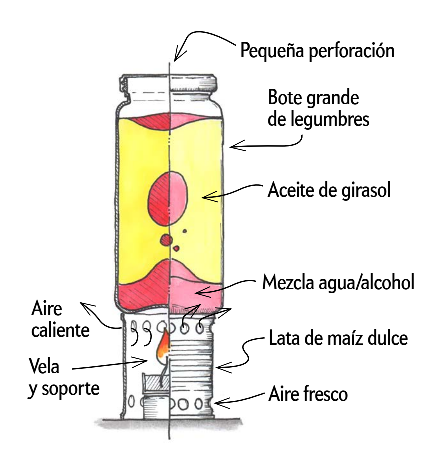
lor del núcleo, arrancan glóbulos calientes y parcialmente fluidos que ascienden hacia la corteza estirándose y formando algo así como un penacho o, mejor dicho, una pluma térmica. Esta hipótesis, la de las plumas mantélicas o puntos calientes, es precisamente la que intentaremos recrear a continuación construyendo algo que decora muchos de nuestros hogares: una lámpara de lava.

Flujos térmicos

Este artefacto, a medio camino entre lo dudosamente decorativo y lo científicamente interesante, consta de un recipiente alto y estilizado en cuyo interior se mueven unos glóbulos fluidos de distintos colores. Estos, de apariencia tersa y aproximadamente esférica, ascienden con lentitud en el seno de otro líquido, este último transparente o translúcido. Al llegar a la parte superior, los glóbulos se estabilizan durante unos minutos para, más tarde, descender de nuevo hasta la base del recipiente, donde se calentarán y reiniciarán el ascenso.

A nadie escapa que el motor de todo este movimiento son las diferencias de temperatura: el recipiente siempre está bastante más caliente que la atmósfera circundante, y la responsable de ese aumento de temperatura es una bombilla situada en la base. Esta bombilla no solo justifica llamar «lámpara» al aparato, sino que también resulta imprescindible para su funcionamiento. ¿Cómo?

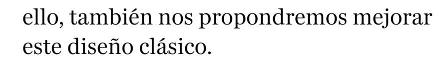
La lámpara de la base calienta el líquido coloreado que, hasta el momento de conectar la alimentación eléctrica, ha permanecido en el fondo. Llamaremos a este líquido «fluido móvil». Al calentarse, se dilata y disminuye su densidad, que se



ha seleccionado previamente para que sea muy próxima a la del líquido transparente por el que circula, al que denominaremos «fluido base».

Con el paso del tiempo, sin embargo, ambos fluidos se calentarán progresivamente, se dilatarán y perderán la diferencia de flotabilidad necesaria para que exista el movimiento. Es aquí donde entra en escena la forma del recipiente. La geometría de la primera lámpara de lava que proponemos aquí (alta y delgada, muy similar a las lámparas de lava comerciales) contribuye al menos de dos maneras al correcto funcionamiento del aparato. Por un lado, presenta una gran superficie de disipación de calor en relación al volumen interno. Por otro, facilita el establecimiento de un gradiente térmico vertical que fuerza corrientes convectivas y, por tanto, la movilidad del sistema.

Sin embargo, este espectáculo poco tiene que ver con el funcionamiento del manto terrestre y las efusiones magmáticas procedentes de las profundidades. Por


ello, también nos propondremos mejorar este diseño clásico.

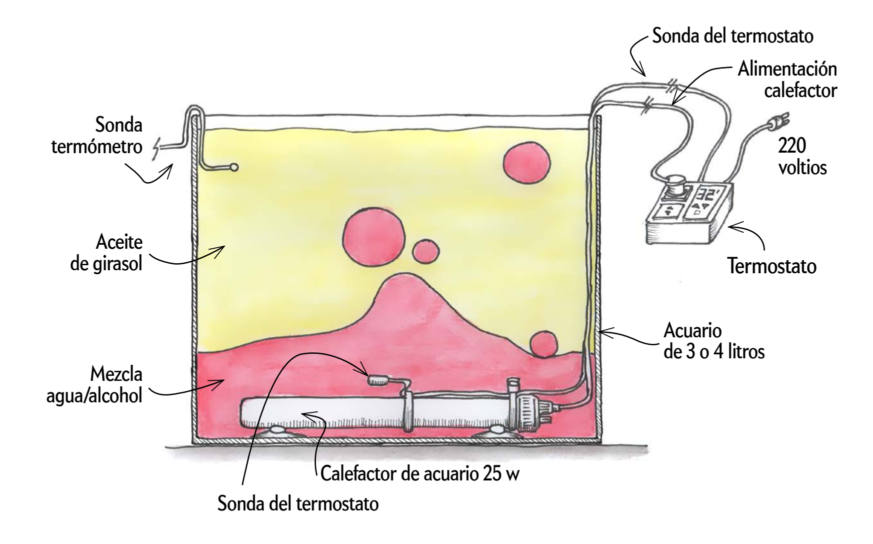
Lámpara comercial

Comencemos buscando un bote de cristal alto y relativamente delgado (los de legumbres resultan óptimos) y dejémoslo perfectamente limpio. Ahora localicemos una lata de conservas que encaje bien en la base del bote (las de maíz dulce para ensaladas son ideales), lavémosla y practiquemos, a un centímetro de su canto superior e inferior, diez o doce agujeros de ocho o diez milímetros de diámetro. Luego fijaremos la lata a la base del bote. Para ello habremos de usar cinta adhesiva de aluminio, ya que tendrá que soportar las altas temperaturas producidas por una vela que colocaremos en el interior de la lata. El primer dibujo que reproducimos aquí aclara los detalles. Ahora llega la fase más delicada: la preparación de los fluidos.

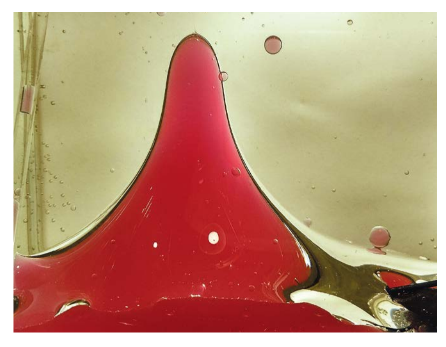
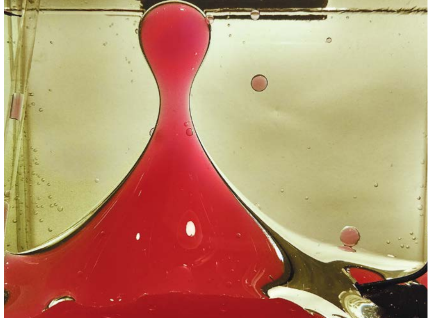
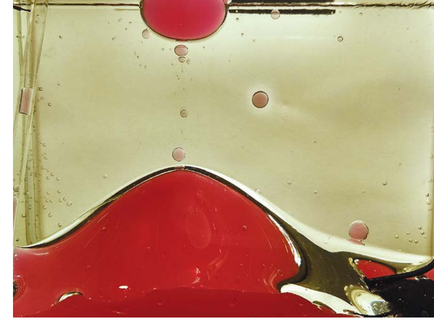
Como apuntábamos arriba, necesitamos líquidos inmiscibles de densidad diferente pero muy próxima. Esto es necesario ya que deseamos establecer un flujo convectivo en el que el líquido móvil se dilate para ascender, pero luego se enfríe, se contraiga y recupere la densidad suficiente para regresar al fondo. Por su disponibilidad y precio, los dos mejores líquidos al respecto son, sin duda, el aceite como fluido base y una mezcla de alcohol y agua como fluido móvil. El primero puede ser aceite vegetal. En nuestro caso, por su precio, fluidez y transparencia, nos hemos decantado por el de girasol. Si buscamos o medimos su densidad, comprobaremos que esta asciende a unos 0,91 gramos por centímetro cúbico.

Por tanto, y en primera aproximación, deberemos preparar una mezcla de alcohol de farmacia (etanol al 96 por ciento, con una densidad de unos 0,8 gr/cm^3) y agua (1 gr/cm^3) a temperatura ambiente. La densidad deseada corresponde aproximadamente a una mezcla al 50 por ciento de ambos líquidos. Sin embargo, hay un problema: las lámparas de lava son muy sensibles a pequeñas diferencias de densidad, de modo que procederemos por tanteo. Ni siquiera operando con un densímetro, como es mi caso, conseguiremos la precisión suficiente. Expliquémonos.

Dependiendo de la densidad exacta de la mezcla de alcohol y agua, la lámpara podrá funcionar perfectamente o con grandes dificultades. Esto nos obliga a retocar la mezcla con pequeñas aportaciones de estos líquidos. Por tanto, mezclemos unos 50 centímetros cúbicos de agua y otros



MARC BOADA FERRER

SECUENCIA de fotografías que ilustra el ascenso del fluido móvil y el desprendimiento de un «glóbulo de lava».

MARC BOADA FERRER

tantos de alcohol, y añadamos unas gotas de colorante alimentario. Deberemos esperar varios minutos a que la mezcla se enfríe y se estabilice térmicamente, ya que al hacerla se calienta y se dilata ligeramente (algo debido a que las mezclas de este tipo experimentan una pequeña contracción de volumen que eleva unas décimas su temperatura).

Una vez a temperatura ambiente, procederemos a llenar tres cuartas partes del bote de cristal con el aceite de girasol. Luego, con una jeringuilla, succionaremos un poco de la mezcla de agua y alcohol y la inyectaremos muy, muy lentamente en el aceite. Al hacerlo, veremos que forma una gota casi esférica. Observemos su comportamiento. ¿Flota? Entonces habremos de parar inmediatamente, pues eso querrá decir que la mezcla es demasiado ligera. ¿Se hunde rápidamente en el aceite? En tal caso tendremos que añadir un poco más de alcohol.

No obstante, tampoco debemos intentar ajustarlo todo en este momento, ya que esencialmente es imposible. Mejor hacerlo con la lámpara en marcha. Por tanto, cuando veamos que la mezcla se hunde lentamente en el aceite, procederemos a inyectarla directamente en el fondo con ayuda de una cánula o tubo conectado a la jeringuilla. En general, tendremos que depositar una cantidad suficiente de líquido como para formar una capa de dos, tres, o cuatro centímetros de espesor.

Ensayo y error

Ha llegado el momento de hacer una primera prueba. Pongamos una vela encendida sobre una pequeña base que la eleve un par de centímetros sobre la mesa. Luego coloquemos la lámpara encima y esperemos, ya que necesitaremos bastantes minutos para que la cosa arranque.

Mientras aguardamos, podremos ver que en la interfaz entre ambos líquidos pasan varias cosas. Al principio es plana y horizontal, pero poco a poco se hará convexa y, si miramos con atención, veremos que se forman venas de aceite caliente que ascienden. Si todo va bien y la densidad del fluido móvil es la adecuada, acabarán formándose ondulaciones que se elevarán hasta formar glóbulos líquidos que subirán hasta la parte superior. Allí permanecerán varios minutos, tras los cuales se enfriarán y comenzarán a descender.

Si las cosas no van tan bien, veremos que los glóbulos no ascienden o que, una vez arriba, no bajan. Entonces no queda más remedio que retocar la mezcla. Para ello, aspiramos con la jeringuilla tanto líquido como podamos, añadimos unos centímetros cúbicos de alcohol si ha tenido dificultades para ascender, o de agua si se resiste a bajar, y volvemos a inyectarlo en el fondo. De esta manera, procediendo por ensayo y error, conseguiremos poco a poco que el ingenio funcione a la perfección.

Lámpara mejorada

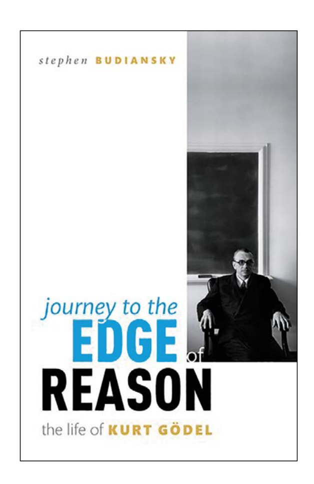
Mediante todas estas manipulaciones, el experimentador habrá disfrutado de imágenes de gran belleza y desarrollado las habilidades necesarias para acometer un segundo dispositivo. En esta ocasión, nuestro objetivo será construir algo cuyo funcionamiento se aproxime más al del vulcanismo que deseamos recrear. Para ello buscaremos un recipiente mucho más amplio, en el que la dinámica del fluido móvil remedará con mayor precisión la fenomenología de las oscilaciones térmicas del manto terrestre en contacto con el núcleo caliente.

Busquemos un pequeño acuario, baratísimo en los bazares orientales. El que ilustra nuestro segundo dibujo tiene tres litros de capacidad. Coloquemos en su fondo un calefactor de acuario de unos 25 vatios de potencia, al que habremos acoplado la sonda de un termostato. Este se va a encargar de limitar su temperatura de forma precisa. Luego, pongamos los mismos fluidos que en el montaje anterior y conectemos la alimentación eléctrica.

Transcurridos unos minutos se iniciará el proceso convectivo. Sin embargo, hay una diferencia: las ondulaciones en la interfaz entre ambos líquidos son ahora espectaculares. A temperaturas bajas, de unos 30 grados Celsius, aparecen ondulaciones, que podemos llegar a estabilizar con ayuda del termostato, terriblemente parecidas a domos y batolitos. Si aumentamos la temperatura, estos domos se separan formando los glóbulos que ya conocemos. Al llegar a la parte superior pueden ocupar un área mayor, enfriándose más rápidamente y acelerando el espectáculo.

Si nos tomamos la molestia de grabar el fenómeno a cámara rápida, descubriremos que el ascenso de los glóbulos sigue siempre los mismos patrones, pero nunca exactamente. Es decir, al igual que ocurre en el mundo real, la llegada de materiales mantélicos a la superficie puede seguir un patrón general pero nunca se repite con exactitud. Podemos introducir un poco de variación en el funcionamiento modificando la temperatura, cambiando ligeramente la densidad del fluido móvil, alterando el volumen de este y, finalmente, poniendo un programador que conecte y desconecte la alimentación eléctrica del calefactor a intervalos variables. Así ocurre en la naturaleza, donde las manifestaciones geotérmicas se producen en intervalos poco predecibles.

El experimentador sagaz sabrá modificar estos dispositivos básicos para adaptarlos a sus intereses. Por ejemplo, podemos sustituir la vela por una bombilla halógena, refrigerar la parte exterior con un ventilador para aumentar las diferencias de temperatura, o diseñar recipientes con fondos no horizontales, donde descubriremos nuevas pautas quizás aún más próximas a la realidad.



JOURNEY TO THE EDGE OF REASON
THE LIFE OF KURT GÖDEL

Stephen Budiansky
Oxford University Press, 2021
368 págs.

La vida y la obra de Kurt Gödel

La entrañable inocencia del genio que cambió para siempre la manera de concebir la matemática

El método axiomático-deductivo es uno de los grandes logros del pensamiento griego. Articulado inicialmente por Aristóteles, alcanzó su forma más depurada con Euclides, cuyos *Elementos* fueron considerados durante siglos el modelo a imitar en la búsqueda de un conocimiento cierto. Del prestigio intelectual del «modo geométrico» de argumentación da testimonio su influencia más allá de las matemáticas. Encontramos ejemplos de él en Descartes y muy especialmente en Spinoza, que redactó los *Principios de la filosofía de Descartes* y la *Ética* siguiendo el patrón de los *Elementos*.

A finales del siglo xix, el matemático David Hilbert quiso llevar este método a sus últimas consecuencias con una reformulación axiomática de la geometría que eliminaba cualquier vestigio de intuición visual. Puntos o líneas se convertían en conceptos abstractos definidos implícitamente por los propios axiomas. Con ello puso en marcha un programa formalista que aspiraba a la axiomatización sistemática de todo el conocimiento matemático comenzando por su base, la aritmética. Dado un sistema de axiomas completo y coherente, todas las verdades matemáticas serían accesibles en un número finito de pasos mediante métodos algorítmicos de prueba. Cualquier problema matemático tendría, por tanto, una solución. «¡En matemáticas no existe el *ignorabimus*!» (ignoraremos), afirmaba categóricamente Hilbert durante su alocución en el II Congreso Internacional de Matemáticas, celebrado en 1900 en París.

Aquel optimismo correría una suerte parecida al de los que, en esos mismos años, proclamaban su fe en el determinismo clásico, que a efectos prácticos habría de ser abandonado en el estudio de los sistemas caóticos y que la mecánica cuántica acabaría refutando a un nivel fundamental. El programa formalista, por su parte, naufragó en 1931, apenas unos meses después de que Hilbert volviera a reivindicarlo públicamente con la frase que sería su epitafio: *Wir müssen wissen, wir werden wissen* («debemos saber, sabremos»).

La causa fue el artículo escrito por un joven de 24 años llamado Kurt Gödel en el que demostraba dos teoremas. El primero afirmaba que, dado un sistema de axiomas lo suficientemente rico como para contener la aritmética, existen enunciados que, siendo ciertos, no pueden ser demostrados algorítmicamente. El segundo concluía que la ausencia de contradicción lógica entre los axiomas (su coherencia) es, asimismo, imposible de demostrar. Con estos dos teoremas, llamados de incompletitud, Gödel mostró que el programa de Hilbert era una entelequia.

En *Journey to the edge of reason*, Stephen Budiansky nos propone un recorrido por la vida, obra, pensamiento y personalidad de Gödel. Un personaje fascinante en lo intelectual y extremadamente complejo en lo personal, que conoció su periodo de mayor creatividad durante los años más convulsos del siglo xx y que se relacionó con los grandes de la ciencia y la filosofía de su tiempo. Combinando múltiples perspectivas, Budiansky construye un relato de las peripecias vitales del protagonista en el que se entretejen su obra lógico-matemática, su filosofía personal y su complicada psicología, así como la historia política, social e intelectual del mundo en que vivió.

Una buena parte del libro está naturalmente dedicada a la obra lógica de Gödel. Además de mostrar la relevancia y el impacto de los dos teoremas de incompletitud, se presenta la idea general de la demostración del primero: su estructura autorreferencial, que sin embargo evita paradojas como la de Russell, y la «numeración de Gödel», que permite traducir los enunciados metamatemáticos en proposiciones aritméticas [*véase* «Así funciona el teorema de Gödel», por Natalie Wolchover; Investigación y Ciencia, agosto de 2021].

También se analiza el otro gran resultado de Gödel: la demostración de que la hipótesis del continuo (que afirma que no hay conjuntos con cardinales intermedios entre el de los números naturales y el de los reales) es imposible de refutar en el contexto de la teoría de conjuntos basada en los axiomas de Zermelo-Fraenkel más el axioma de elección (ZFC). Un teorema que supuso el primer paso hacia la histórica prueba de Paul Cohen de que la hipótesis es de hecho indecidible en el sentido del primer teorema de incompletitud, ya que ni ella ni su negación son demostrables dentro del sistema de axiomas ZFC [*véase* «Demostrar la hipótesis del continuo», por Jean-Paul Delahaye; Investigación y Ciencia, mayo de 2020].

Pero el libro no desatiende ni mucho menos los otros intereses de Gödel. Por supuesto, incluye su incursión en la relatividad general con el «universo de Gödel», pero también y particularmente sus ideas filosóficas, que son de especial relevancia a la luz del ambiente intelectual de su juventud. Como nos explica Budiansky, a pesar de su participación —eminentemente pasiva— en el Círculo de Viena, Gödel mantuvo posturas filosóficas opuestas a las del positivismo lógico. Así, frente a la doctrina positivista de que el significado de una proposición radica en su proceso de verificación empírica, Gödel creía en la capacidad de la razón para alcanzar verdades no susceptibles de comprobación experimental, por ejemplo en matemáticas. Sus propios teoremas de incompletitud eran para él un indicio de la supremacía de la mente humana sobre cualquier intento de «automatización» del conocimiento matemático.

En este sentido se situó también en las antípodas de la noción, que los positivistas tomaron de Wittgenstein, de que las matemáticas son un sistema sintáctico y que la «verdad» de sus proposiciones radica en que estas sean sintácticamente correctas. Gödel fue un inveterado platónico que sostuvo la realidad no empírica de las verdades matemáticas, las cuales

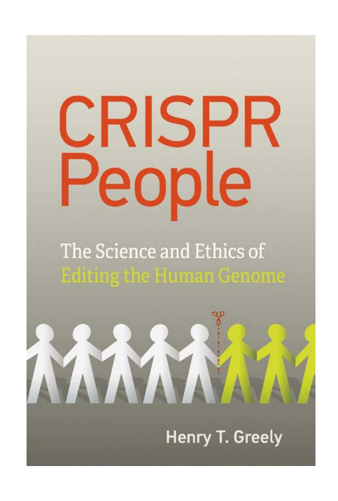
son descubiertas, y no formuladas o inventadas [*véase* «¿Son reales las matemáticas?», por Kelsey Houston-Edwards; Investigación y Ciencia, noviembre de 2019]. Una idea que el también realista Paul Erdős expresaba metafóricamente refiriéndose a «El Libro» en poder de la divinidad que contenía todos los teoremas matemáticos, así como sus demostraciones más perfectas y elegantes.

La narración de Budiansky nos descubre magistralmente al Gödel más personal. Testimonios y anécdotas ponen de manifiesto lo que el matemático Karl Sigmund llamaba la «entrañable inocencia» que siempre lo caracterizó. Todo esto en el trasfondo de sus graves problemas psicológicos, que desde mediados de los años treinta lo transformaron y aislaron progresivamente. A diferencia de su etapa vienesa, en la que mantuvo una activa vida social, sus relaciones personales en Princeton fueron escasísimas. Aparte de Albert Einstein, a quien le unió una legendaria amistad, tan solo cabe mencionar a John von Neumann, Oskar Morgenstern y, en sus últimos años, al filósofo Hao Wang, a quien debemos gran cantidad de información sobre las ideas filosóficas del Gödel maduro.

Uno de los aspectos más sobresalientes de *Journey to the edge of reason* es la forma en que la vida de Gödel se entrelaza con su complejo trasfondo histórico: la monarquía austrohúngara, su hundimiento y la Viena de entreguerras; ambientes magistralmente retratados en la literatura de Stefan Zweig, Joseph Roth y Arthur Schnitzler, a la que Budiansky recurre con frecuencia. También la creación del Instituto de Estudios Avanzados y la vida de los emigrados europeos en Princeton. Especialmente vívida es la descripción del enrarecido ambiente político y social de la universidad vienesa de los años veinte y treinta, la creciente violencia antisemita y la disolución progresiva del Círculo de Viena, que culmina con el asesinato en 1936 de su fundador, Moritz Schlick.

Aunque la vida de Gödel ya se ha contado en otras ocasiones y con varios énfasis (recordemos, entre otros, los libros de Rebecca Goldstein o Palle Yourgrau), puede afirmarse sin titubeos que Budiansky ha escrito una biografía redonda. Gracias a una extraordinaria fluidez narrativa y a un equilibrio perfecto entre la persona, su ciencia y su tiempo, *Journey to the edge of reason* hace revivir a Gödel ante los ojos del lector en toda su compleja genialidad y, sobre todo, humanidad. Una deliciosa y gratificante lectura para toda persona interesada en la historia de la lógica y las matemáticas, o simplemente del pensamiento del siglo xx.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental,
Universidad de Salamanca



CRISPR PEOPLE
THE SCIENCE AND ETHICS OF EDITING THE HUMAN GENOME
Henry T. Greely
MIT Press, 2021
400 págs.

Ciencia y ética en el caso de He Jiankui

Un documentado testimonio de la historia que hizo saltar todas las alarmas bioéticas de la edición genómica

No han transcurrido ni diez años desde que aparecieron los primeros trabajos sobre el uso del sistema CRISPR en edición genética, una historia que Henry T. Greely trenza a través del caso He Jiankui y su experimento sobre modificación de embriones humanos. Bioético y jurista de profesión, Greely nos ofrece en *CRISPR people* un libro documentado, preciso y sin concesiones a lo anecdótico, pese a estar redactado a menudo en primera persona dada su participación en los hechos narrados. Fiscal unas veces por su exhaustiva inquisición de todas las caras del poliedro, juez en otras con las pruebas sopesadas, Greely aplica una fina criba científica, jurídica y ética a un experimento que epitomiza el presente y futuro de la edición genómica humana de la línea germinal.

El 25 de noviembre de 2018, los pilares de la ciencia y de la ética asociada a su avance se tambalearon. Un joven investigador chino formado en EE.UU., con cuya comunidad científica seguía estrechamente relacionado, declaró que un mes antes habían nacido dos gemelas a partir de sendos embriones cuyo ADN había sido manipulado antes de implantarlos en el útero materno. Aquellas gemelas fueron los primeros humanos cuyos genes habían sido editados en su línea germinal, con lo que los cambios pasarían también a su progenie. Ni con la clonación de la oveja Dolly en 1996, con la que se comparó en seguida el suceso, ocurrió algo similar.

¿Qué significado encerraba todo aquello para la ciencia y para la misma especie humana? Greely analiza qué se hizo, cómo se hizo y de qué manera reaccionó la sociedad ante esa intervención sin precedentes en el genoma humano. En el área de la salud, la investigación básica ha venido aplicando técnicas de biología molecular para descifrar todo tipo de incógnitas. Por su lado, la praxis clínica ha recurrido a dichas técnicas para tratar enfermedades o prevenirlas. Se han dado pasos importantes en la elucidación del papel de la genética en la anemia falciforme, la distrofia muscular, la fibrosis cística, la sordera o la ceguera. Hay más de 10.000 enfermedades que se deben a mutaciones genéticas. Algunas resultan directamente de la mutación de un solo gen, pero la mayoría implica una compleja imbricación de factores genéticos y ambientales.

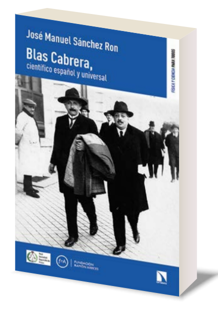
Fruto de la colaboración entre la industria y la academia, entre 1994 y 2010 aparecieron las técnicas de edición genómica basadas en nucleasas diseñadas *ad hoc*. Existen varias plataformas de edición del genoma, entre las que destacan las nucleasas asociadas al sistema CRISPR-Cas9 [*véase* «El descubrimiento del sistema CRISPR-Cas», por Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros; Investigación y Ciencia, octubre de 2017].

NOVEDADES

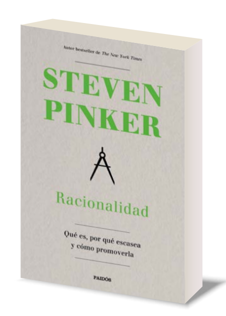
Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



BULLSHIT: CONTRA LA CHARLATANERÍA
SER ESCÉPTICO EN UN MUNDO BASADO EN LOS DATOS
Carl T. Bergstrom y Jevin D. West
Capitán Swing, 2021
ISBN: 978-84-123902-0-9
414 págs. (23 €)



BLAS CABRERA
CIENTÍFICO ESPAÑOL Y UNIVERSAL
José Manuel Sánchez Ron
Catarata, 2021
ISBN: 978-84-1352-287-6
384 págs. (21 €)



RACIONALIDAD
QUÉ ES, POR QUÉ ESCASEA Y CÓMO PROMOVERLA
Steven Pinker
Paidós, 2021
ISBN: 978-84-493-3861-8
536 págs. (28 €)

Cuando, en junio de 2012, *Science* publicó un artículo de Jennifer Doudna y otros investigadores sobre la naturaleza y posibilidades del sistema CRISPR, la comunidad científica viró su hoja de ruta. Aquella herramienta permitía editar, con sencillez y celeridad, el ADN de plantas y animales. Aquel fue uno de los avances más revolucionarios de la historia de la biología, razón por la cual años más tarde Doudna y Emmanuelle Charpentier recibirían el Nobel. Pero este avance encierra un poder descomunal que puede usarse para bien y para mal: para evitar enfermedades letales o para crear bebés a la carta. En menos de un lustro la técnica entró en todos los laboratorios del mundo, y hoy su horizonte de aplicaciones no parece agotarse. Pero la creación de las gemelas, escribió George Church, mostró que el genio de la edición genómica había escapado de la botella. La técnica había despertado inquietud y esperanza a partes iguales, con la controversia ética como telón de fondo [*véase* «La aplicación de CRISPR en humanos», por Marc Güell; Investigación y Ciencia, enero de 2020].

He se familiarizó con la técnica mientras hacía su doctorado en la Universidad Rice. Tras un tiempo en Stanford, en 2012 volvió a su China natal. Fundó en Shenzhen la compañía Direct Genomics, especializada en el mercado de la secuenciación clínica, y atrajo cientos de millones de dólares en inversiones. Deseoso de introducirse en el campo de la edición genética, visitó a Feng Zhang, pionero de CRISPR, en su laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts, quien le aconsejó que no editara embriones con vistas a su implantación uterina. De Mark DeWitt, genetista de la Universidad de California en Berkeley, recibió el mismo consejo. No pudo entrevistarse con Doudna, también de Berkeley y quien, a tenor de lo sucedido, se preguntaría más tarde si lo que He pretendía era hacerse con una carpeta de contactos respetables para aparentar un amplio apoyo. He presentó esbozos de sus trabajos en reuniones y congresos en EE.UU., pero comunicó a muy pocos sus planes de llegar a la implantación, el embarazo y el nacimiento.

Fue en marzo de 2015 cuando un equipo chino acometió la primera edición genómica en embriones humanos. Un año después, en junio de 2016, He avanzaba de manera formal su proyecto para editar genes de embriones humanos in vitro mediante la técnica CRISPR. Acotaba su programa a parejas en las que el padre fuera portador del VIH. En marzo de 2017, empezó a reclutar candidatos. Hasta noviembre de 2018 no informó del nacimiento de las dos niñas ni tampoco de un segundo experimento con un tercer embrión cuyo genoma también se había editado. Una declaración que coincidió en fecha con su participación en un artículo en *The CRISPR Journal* donde se señalaba, paradójicamente, un proyecto de normas éticas aplicables al uso de la edición genética en técnicas de reproducción. La revista retiró el artículo en febrero de 2019, aduciendo que He no había informado de que estaba llevando a cabo ensayos clínicos que implicaban la edición de la línea germinal de embriones humanos.

Para entonces, el experimento de He, presentado en víspera de la Segunda Cumbre Internacional sobre Edición Genómica, celebrada en Hong Kong, había desencadenado la indignación general por haberse saltado todas las normas éticas. El presidente de la Academia Nacional de Ciencias de China y el de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de EE.UU. urgieron en diciembre de 2018 a un acuerdo internacional sobre criterios para la edición de la línea germinal. Aquella debía ser una condena universal al trabajo de He, y en ella se apelaba al espíritu de la Conferencia de Asilomar sobre ADN recombinante de 1975, cuando se establecieron unas normas éticas y unos protocolos metodológicos.

Greely muestra con datos abrumadores que había científicos que conocían de una manera u otra los pasos de He; un trabajo emprendido sin suficiente experiencia en animales y una violación flagrante del consenso internacional. He y su equipo aplicaron la técnica CRISPR para modificar en los embriones el gen CCR5, ya que las personas que nacen con las dos copias de dicho gen inactivadas son resistentes al VIH. Pero cambiar los genes de un embrión significa cambiar los de todas las células. Si el experimento tiene éxito, el bebé presentará alteraciones que heredará su progenie generación tras generación. Y eso, coinciden los científicos, constituye un camino que debe acometerse con la máxima prudencia y deliberación. Algunos opinan que debe reservarse a enfermedades graves para cuya curación no haya otra alternativa; otros sostienen que no debe realizarse en ningún caso. He prescindió de la deontología profesional e inactivó CCR5, un gen normal.

—Luis Alonso

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



El yin y el yang fractal

El misticismo oriental, el número áureo y una sucesión infinita de números metálicos





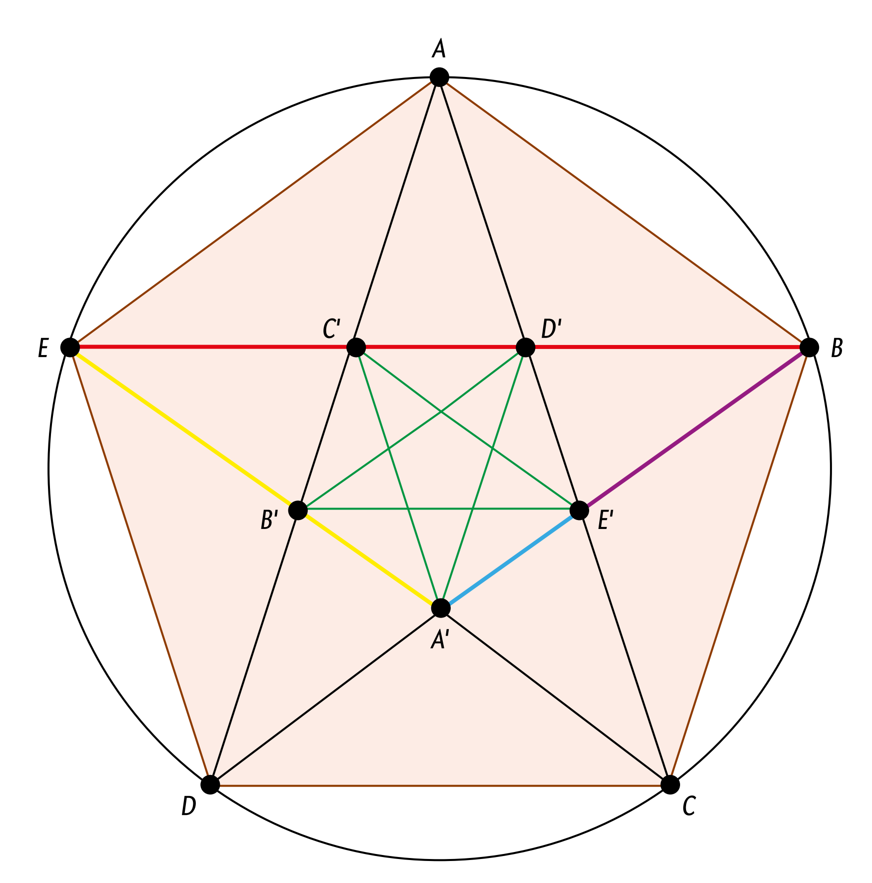
LA REPRESENTACIÓN MÁS CONOCIDA del yin y el yang es un círculo dividido en dos regiones entrelazadas y separadas por dos semicircunferencias. En China se conoce como «*taijitu* de los primeros tiempos» y simboliza los conceptos taoístas del yin, el yang y el *taiji*, el principio generador de todas las cosas. Es habitual que aparezca rodeado por ocho trigramas del *I Ching*, como lo hacía en la primera portada de *Investigación y Ciencia*.

GETTY IMAGES/GEORGEMANGA/ISTOCK, MODIFICADO POR IYC

La primera columna de «Juegos matemáticos» apareció firmada por Martin Gardner en el primer número de *Investigación y Ciencia*, en octubre de 1976. La revista se presentaba como la edición en español de *Scientific American*, donde *Mathematical games* era, gracias a Gardner, su sección más popular y mundialmente conocida. Años después el testigo de la columna fue tomado sucesivamente por tres grandes divulgadores: Douglas Hofstadter, con el título de *Metamagical themas* (1981-1983); Alexander K. Dewdney, con *Mathematical recreations* y *Computer recreations* (1984-1991); y Ian Stewart, de nuevo con la cabecera *Mathematical recreations* (1991-2001).

A partir de entonces, *Investigación y Ciencia* decidió devolver a la sección su título original, «Juegos matemáticos», y ponerla a cargo de un divulgador hispanohablante. El primero en tener ese honor fue Juan Manuel R. Parrondo, uno de los físicos más notables de nuestro país, que la escribió durante ocho años (2001-2008). Después tomaron las riendas los filósofos Agustín Rayo, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Gabriel Uzquiano, de la Universidad de California del Sur, quienes se ocuparon de ella hasta 2013. Ese año hice mi primera contribución a la sección, que durante cinco años alterné con el filósofo Alejandro Pérez Carballo, de la Universidad de Massachusetts. Desde 2018 la escribo en solitario.

Esta es la última columna de «Juegos matemáticos» en papel porque esta es la última revista en papel de *Investigación y Ciencia*. A la redacción le pareció que una manera elegante y emotiva de cerrar este ciclo era acabar con una portada semejante a la del primer número,



1. PENTAGRAMA MÍSTICO de la escuela pitagórica (*azul*) con una iteración interna (*verde*). El cociente entre varios de los segmentos que lo definen arroja siempre el número áureo, φ. Por ejemplo, $EB/EA' = EA'/BE' = BE'/E'A' = \varphi$.

publicado hace ahora 45 años. Aquella portada estaba dedicada precisamente a la columna de Gardner, titulada «La base combinatoria del "I Ching", el libro chino de la adivinación y la sabiduría», por lo que a la redacción también le pareció conveniente que esta última columna de «Juegos matemáticos» en papel recrease el tema. Así que aquí me tienen, cumpliendo el honor.

En su artículo, Martin Gardner desmenuzaba el libro-oráculo chino conocido como *I Ching*, sobre el cual poco dejaba por rascar. Sin embargo, algo que aquella columna no trataba era la geometría del famoso símbolo del yin y el yang, que no obstante ocupaba el centro de la portada de aquel primer número de *Investigación y Ciencia*. Aunque Gardner ya se había ocupado de él en una de sus columnas de *Scientific American*, traducida a nuestra lengua en el libro recopilatorio *Nuevos pasatiempos matemáticos*, la referencia aparecía dentro de una pequeña colección de nueve problemas y era una extensión de un acertijo de división del símbolo propuesto por el famoso creador de rompecabezas matemáticos Henry E. Dudeney. Así que pensé que, quizá, jugando con él podría surgir algo interesante. Lo que sigue es el resultado.

El pentagrama pitagórico y el *taijitu* de los primeros tiempos

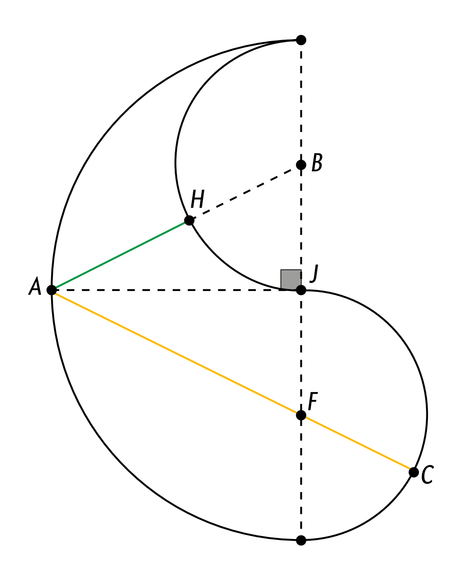
El símbolo del yin y el yang, también conocido como «*taijitu* de los primeros tiempos», es tan reconocible en Oriente como lo es la cruz cristiana en Occidente. Dado que es un símbolo místico, nos trae a la cabeza el que probablemente sea el símbolo místico más famoso de las matemáticas: el pentagrama pitagórico. Una estrella de cinco puntas que, tomadas como vértices, forman un pentágono inscrito en un círculo (*véase la figura 1*).

Resulta irónico que, a poco que se hurgue en el emblema de la escuela pitagórica, salte a la vista lo que a la postre sería el motivo de su propia destrucción: un número irracional. El lector puede demostrar por sí mismo (o encontrar la demostración en multitud de sitios) que el cociente entre varios de los segmentos que definen el pentagrama es nada menos que $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2$, el celebérrimo número áureo.

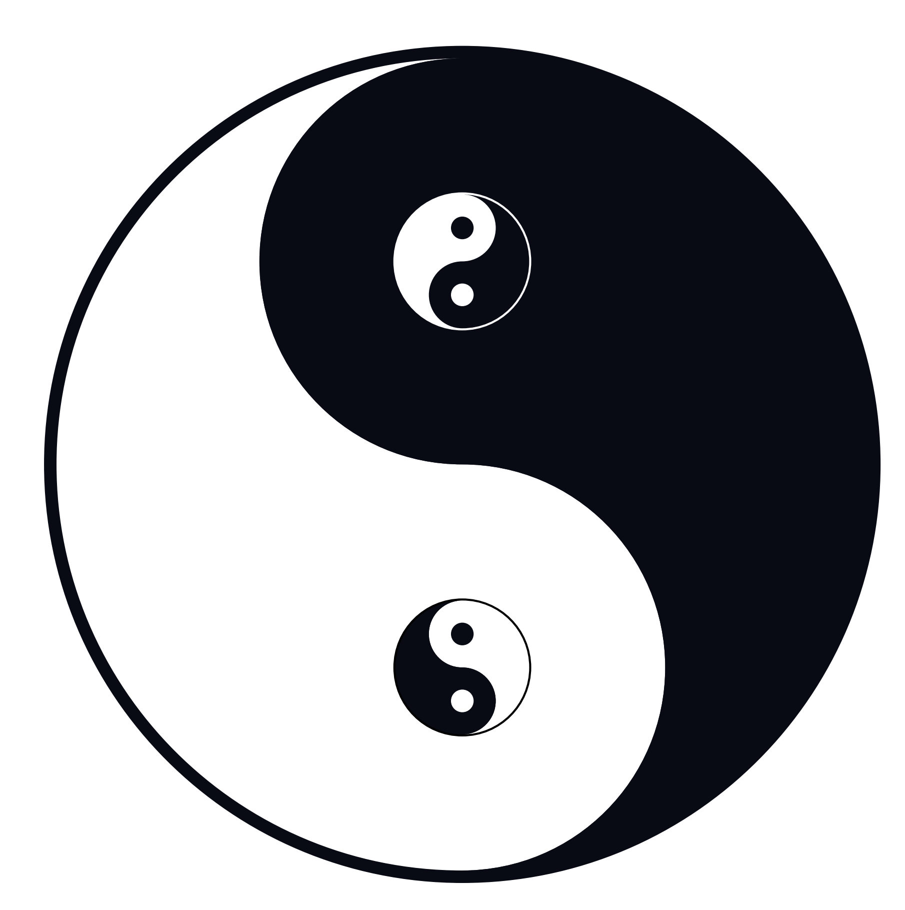
¿Podemos hallar alguna gema similar en la construcción geométrica del *taijitu* de los primeros tiempos? Según el taoísmo, el yin y el yang representan conceptos o fuerzas opuestas, como la noche y el día, el frío y el calor, o el papel y lo digital. Esas dos fuerzas están en permanente conflicto buscando su supremacía en el mundo, pero el camino recto es aquel que conduce a su coexistencia ideal en equilibrio y armonía.

El emblema clásico del yin y el yang es un círculo dividido en dos regiones entrelazadas y separadas por dos semicircunferencias, una negra y otra blanca, que en China se conocen popularmente como «peces yin y yang». En el diagrama, el yin, el aspecto negativo, se simboliza en negro; el yang, el aspecto positivo, en blanco. Se trata de una manera ingeniosa de presentar la coexistencia equilibrada de aspectos opuestos.

Supongamos, sin pérdida de generalidad, que el círculo del emblema tiene radio unidad; es decir, que el segmento AJ mide 1 (*véase la figura 2*). En tal caso, los radios de las dos circunferencias internas medirán la mitad: $BJ = FJ = FC = BH = 1/2$. Por el teorema de Pitágoras, tenemos entonces que el segmento $AB = AF = \sqrt{5}/2$. Por tanto, la longitud del segmento AC será $1/2 + \sqrt{5}/2 = \varphi$. ¡De nuevo el número áureo! Al mismo tiempo, vemos también que la longitud del segmento AH es $\sqrt{5}/2 - 1/2 = 1/\varphi$, su inverso.



2. SILUETA DEL PEZ YANG donde se indica el radio AJ del círculo *taijitu* y los radios FJ y BJ de las cabezas de los peces yin y yang. Tomando un radio unidad para el círculo exterior, resulta sencillo demostrar que el segmento amarillo mide φ, y el verde, 1/φ.



3. PRIMERA ITERACIÓN DEL *TAIJITU* FRACTAL, en la que cada uno de los círculos pequeños se ha convertido en un *minitaijitu*. El inferior muestra los peces girando en el mismo sentido que los del *taijitu* original. En el superior, los peces aparecen girando en sentido contrario y con el blanco a la izquierda y el negro a la derecha. Aplicando estas reglas una y otra vez a los pequeños círculos que van surgiendo, llegamos al *taijitu* fractal.

GETTY IMAGES/GEORGEMANGA/ISTOCK, MODIFICADO POR IYC

Tras haber descubierto geométricamente que el número áureo no solo es místico sino también transcultural, podemos preguntarnos si existe algún par de números que sean yin y yang desde un punto de vista algebraico. Recordemos que, a partir de la definición de la sección áurea que daba Euclides en sus *Elementos*, podemos construir una ecuación algebraica cuya solución sea el número áureo. Como es bien sabido, dicho requisito lo cumple la ecuación cuadrática $x^2 - x - 1 = 0$.

El blanco y el negro del *taijitu* nos recuerdan que el yin y el yang se niegan mutuamente, y que de su unión como peces invertidos se forma el *taiji*, o principio generador de todas las cosas. Si interpretamos los números $-x$ y $1/x$ como la «negación» y la «inversión» de x, respectivamente, un número yang x debería ser tal que su unión con la negación de su inverso, $-1/x$, el yin, forme la unidad *taiji*.

Expresada algebraicamente, esta relación nos da la ecuación $x + (-1/x) = 1$, que no es otra que la misma ecuación cuadrática que tiene como soluciones el número áureo y su inverso negativo, φ y $-1/\varphi$. El yin y el yang que, sumados, forman la unidad: $\varphi - 1/\varphi = 1$.

El *taijitu* fractal

Según el taoísmo, nada es completamente yin ni completamente yang. Por ejemplo, el invierno (yin) se opone al verano (yang), aunque en un día de verano puede hacer frío (yin) y en un día de invierno puede hacer calor (yang). Leemos en papel impreso digitalmente y exigimos al libro electrónico que nos resulte tan agradable a la vista como uno de papel. Los dos pequeños círculos del símbolo clásico nos recuerdan justamente eso: que en el yin siempre hay algo de yang, y al revés. Pero, entonces, en el yang que hay en el yin debería haber también algo de yin... un momento que encuentro oportuno para levantarme a hacerme un *gin-tonic*.

¿Podríamos incluir todas estas ideas en la geometría del símbolo clásico *taijitu*? Tras tomar un sorbo de *gin-tonic*, me resulta natural hacerlo convirtiéndolo en un fractal. Podemos comenzar dibujando un *minitaijitu* convenientemente escalado y orientado en cada uno de los círculos menores (*véase la figura 3*), y repetir esta operación una y otra vez con los nuevos círculos, los cuales crecen exponencialmente en número, al mismo tiempo que sus tamaños decrecen también exponencialmente.

¿Qué números representarán a estos nuevos miniyin y miniyang? Si, al comenzar con el símbolo clásico ($n = 1$), los números yin y yang debían sumar 1 según la ecuación $x + (-1/x) = 1$, para la siguiente iteración ($n = 2$) deberían cumplir que $x + (-1/x) = 2$; es decir, $x^2 - 2x - 1 = 0$. Las soluciones son ahora los números irracionales $\varphi_2 = 1 + \sqrt{2}$, conocido como «número de plata», y $-1/\varphi_2 = 1 - \sqrt{2}$.

Una iteración más ($n = 3$) obliga a que los números yin y yang satisfagan la ecuación $x + (-1/x) = 3$, o $x^2 - 3x - 1 = 0$. Esta nos da como solución el «número de bronce»: $\varphi_3 = (3 + \sqrt{13})/2$.

En general, para el paso n-ésimo, tendremos que los números yin x y yang $-1/x$ cumplirán $x + (-1/x) = n$; es decir, la ecuación $x^2 - nx - 1 = 0$, cuyas soluciones positivas son los llamados «números metálicos»: $\varphi_n = (n + \sqrt{n^2 + 4})/2$. Estos harán de números yang, y sus inversos negativos, $-1/\varphi_n = (n - \sqrt{n^2 + 4})/2$, de números yin.

Observemos que cuando n crece hasta el infinito para convertir nuestro *taijitu* en un fractal, el número yang asociado resulta ser ∞, y su inverso negativo, su complementario yin, el 0. La nada en el todo y el todo en la nada. Una metáfora de cómo el universo entero pudo surgir de una fluctuación del vacío cuántico, como diría mi querido editor Ernesto Lozano, por el que levanto mi copa y al que dedico esta última columna en papel, que siempre le estará en deuda. IyC

PARA SABER MÁS

Nuevos pasatiempos matemáticos. Martin Gardner. Alianza Editorial, 1982.

Golden ratio in yin-yang. Alexander Bogomolny en https://www.cut-the-knot.org/do_you_know/GoldenRatioInYinYang.shtml

EN NUESTRO ARCHIVO

La base combinatoria del «I Ching», el libro chino de la adivinación y la sabiduría. Martin Gardner en *IyC*, octubre de 1976.

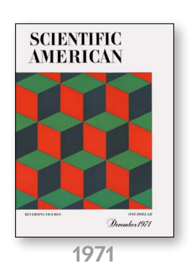
Recopilación de Mark Fischetti

DICIEMBRE

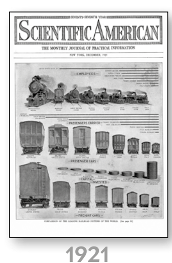
1971

¿Cómo respiran las aves?

«El sistema respiratorio de las aves suministra oxígeno suficiente para que puedan volar a gran altura. Pero ¿cómo lo consigue? Sus huesos contienen aire, no solo los más grandes, sino a menudo también los más pequeños y los del cráneo. Las aves tienen dos pulmones que están conectados con el exterior por la tráquea, pero también lo están con varias grandes bolsas de aire de pared delgada que llenan buena parte del torso y la cavidad abdominal. Las bolsas están conectadas a los huecos de aire de los huesos. Es así evidente que la sangre, cuando está a punto de abandonar los pulmones, puede tomar oxígeno de un aire que contiene la máxima concentración disponible del gas en todo el sistema.»



1971



1921



1871

1921

Necesitamos profesores que experimenten

«¿Qué debe hacer Estados Unidos para establecerse como país líder en el comercio mundial? Algo imprescindible es un cuerpo de investigadores calificados. Hoy en día, lo que hacemos la mayoría de nosotros depende de algún fenómeno o propiedad de la materia desconocidos hace un siglo, que ahora se ha convertido en un pilar de la civilización. Tenemos unos laboratorios espléndidos. Poseemos cuantiosos materiales. Disponemos de dinero abundante. Pero necesitamos más profesores de universidad que no se conformen con ofrecer a sus alumnos solo las conclusiones de científicos del pasado, sino que ellos mismos experimenten para descubrir hechos científicos nuevos, y que animen a sus a alumnos a experimentar. —W. R. Whitney, director, Laboratorio de Investigación de General Electric.»

Humo sí, fuego no

«En Inglaterra se ha inventado un tipo nuevo de alarma contra incendios. Funciona con la presencia de humo y no la afectan los cambios de temperatura, que suelen ser el factor principal que activa la mayoría de esos dispositivos. El detector de humos consiste en un cilindro de metal de unos veinte centímetros de largo y cinco centímetros de diámetro, abierto en cada extremo para que el aire circule libremente, y que contiene dos cápsulas metálicas rectangulares, una de las cuales es notablemente mayor que la otra. El humo en contacto con las cápsulas hace que una de ellas se curve más que la otra, y así se cierra un circuito eléctrico que acciona una potente campana eléctrica u otra señal de alarma. La ventaja es que su acción es más rápida y fiable. En muchos incendios se produce un humo denso antes de que suba la temperatura de los materiales.»

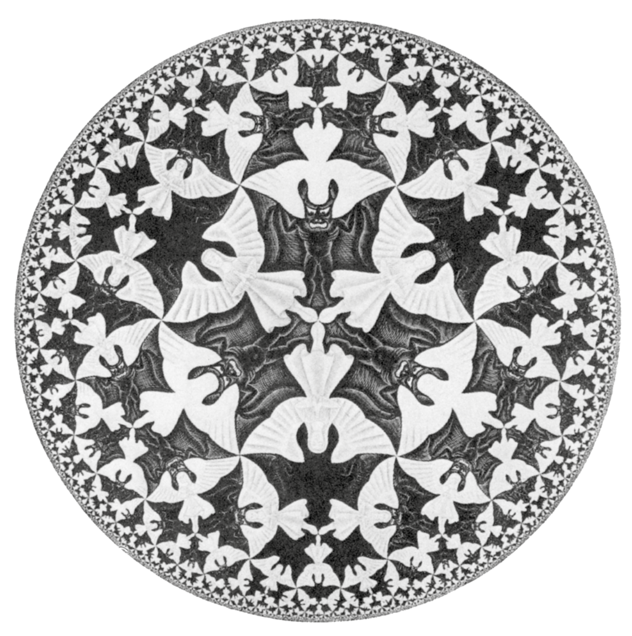
1871

Necesitamos también una educación práctica

«El hábito de aprenderlo todo de memoria, y de recitarlo como loros, ha llegado a incrustarse tanto en nuestro sistema educativo que parece casi imposible hallar un explosivo lo bastante eficaz para volarlo. Es probable que debamos mirar al Oeste. En la Universidad de Iowa, en vez de enseñar física, química, geología y astronomía mediante exposición oral y conferencias sin ilustraciones, han creado unos laboratorios y talleres donde pueden aprenderse de forma práctica cuestiones prácticas. Los consejeros han decidido situar los elementos de las ciencias físicas al inicio del curso. Su intención no es esperar a que el alumno, a base de machacar sobre hechos escuetos y principios abstractos, desarrolle una aversión por todas las ramas del saber. Creen más inteligente seguir el método natural y empezar cuando la mente está ansiosa por indagar sobre la causa de las cosas.»

Carne deshidratada

«En la reunión del Liceo de Historia Natural, el doctor H. Endemann dio cuenta de un proceso de su invención. Unos 50 kilogramos de carne se introducen en una chimenea diseñada para ello, por la cual circula aire caliente a 60 grados Celsius impulsado por un extractor, hasta que la carne queda del todo seca. Luego se muele en polvo y se empaqueta en papel ordinario. Puede también comprimirse en pastillas. Unos 250 o 300 gramos de polvo representan un kilogramo de carne. Untada en pan, su sabor es excelente y preferible al del producto crudo. Su olor es agradable y aromático. Y, como siguen presentes toda la albúmina y la fibrina, se conservan todas las propiedades nutritivas de la carne.»



1971: Ilusiones ópticas como esta de M. C. Escher aprovechan un fenómeno que reta al sistema representativo cerebral: la inversión figura-fondo, en la cual dos formas comparten una parte del contorno. Al cerebro le cuesta discernir qué forma debe considerar como figura y cuál como fondo. ¿Vemos ángeles blancos o diablos negros?

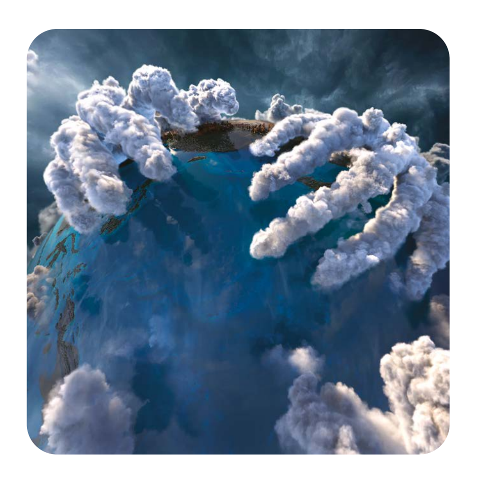
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 225, N.º 6, DICIEMBRE DE 1971

CAMBIO CLIMÁTICO

Tormentas de vapor

Jennifer A. Francis

El aumento de la humedad atmosférica está intensificando los huracanes y las inundaciones.



ZOOLOGÍA

Babuinos sagrados

Nathaniel J. Dominy

El estudio de babuinos vivos y momificados revela por qué los antiguos egipcios veneraban a estos primates e indica la probable ubicación de un reino de fábula.

FÍSICA CUÁNTICA

La no localidad en la Internet cuántica

Marc-Olivier Renou, Nicolas Brunner y Nicolas Gisin

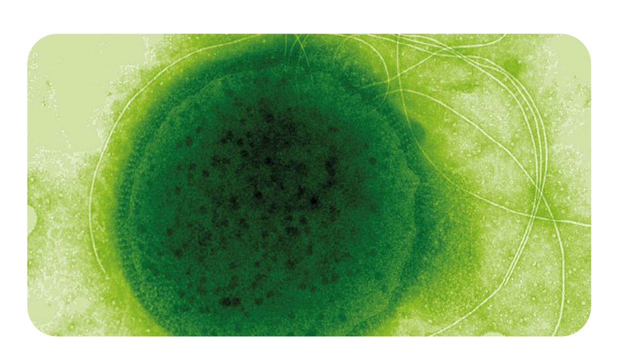
Las redes formadas por varias fuentes de partículas han obligado a los físicos a reexaminar los fundamentos de la información cuántica.

BIOLOGÍA

El enigmático microorganismo que dio origen a la vida compleja

Amber Dance

El estudio de las arqueas está proporcionando nuevas pistas sobre la evolución de los organismos eucariotas.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y Semillas y frutos extraños de todo el planeta*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes, Más comida, menos desperdicios y El IPCC debe redirigir sus esfuerzos*; Anna Ferran: *El cerebro puede recordar y reactivar respuestas inmunitarias antiguas*; Javier Grande: *Categorías infinitas y Así es el telescopio espacial James Webb*; Miguel A. Vázquez Mozo: *Un algoritmo que diseña experimentos cuánticos*; Xavier Roqué: *Políticas de memoria nuclear*; Fabio Teixidó: *Manifiesto por la protección de la biodiversidad y El ocaso de los anfibios*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España